no. 3 (2002)
LIBRARY
NOAA, NMFS Honolulu Lab.
2570 Dole St.
Honolulu, Hawaii 96822-2396

ISSN 1346-9894
水研センター研報
Bull.Fish.Res.Agen.

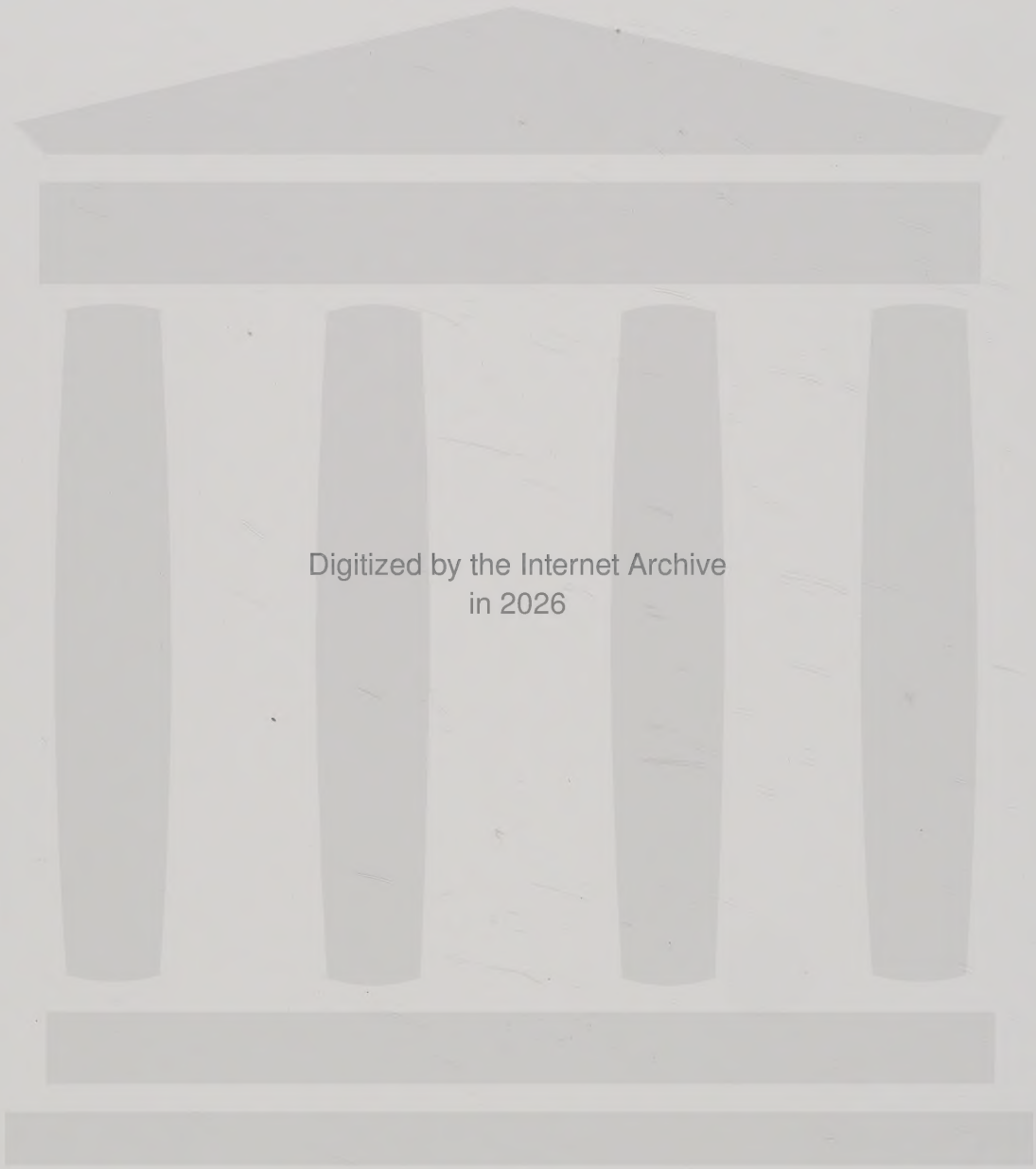
水産総合研究センター
研究報告

3
平成14年3月

BULLETIN OF
FISHERIES RESEARCH AGENCY

No. 3
March 2002

独立行政法人 水産総合研究センター
神奈川県横浜市
FISHERIES RESEARCH AGENCY
Yokohama, Kanagawa, Japan



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/bulletin-japan-fisheries-research-education-agency_2002-03_3

水産総合研究センター研究報告

第３号　　平成14年３月

目　　次

（報　文）

マダガスカルのエビ孵化場において
Penaeus monodon 稚エビの付属肢に形成された褐色小塊について（英文）
佐野　元彦・岩川　秀人・末光　正典・皆川　恵
・Juliette Rasoariniro・Louisette RZAFINDRADOANY …… 1

ツノナシオキアミ漁業の変遷及び漁況の特徴について
瀧　憲司…… 7

（短　報）

夏季東シナ海大陸棚におけるカドミウム、リン、窒素の再生（英文）
阿部　和雄…… 27

（博士号論文）

バフンウニ生殖巣の新規苦味アミノ酸プルケリミンに関する研究（英文）
村田　祐子…… 31

西部北太平洋熱帯域におけるカツオの初期生態に関する研究
田邊　智唯…… 63

（和文要旨）…… 133

LIBRARY
NOAA, NMFS Honolulu Lab.
2570 Dole St.
Honolulu, Hawaii 96822-2396

水研センター研報, 第3号, 1－6, 平成14年
Bull. Fish. Res. Agen., No. 3, 1－6, 2002

Brown nodules formed in the appendages of *Penaeus monodon* postlarvae cultured in a hatchery in Madagascar

Motohiko SANO*[1], Hideto IWAKAWA*[2], Masanori SUEMITSU*[2], Megumi MINAGAWA*[1,4]
Juliette RASOARINIRO*[3], and Louisette RZAFINDRADOANY*[3]

Abstract Brown nodules, leading to shrimp mortality, frequently formed in the appendages of *Penaeus monodon* postlarvae cultured in a hatchery in Madagascar. The nodules resulted from a melanized hemocytic host reaction, which was activated by the necrosis of the cuticular epithelium of the appendages. In histopathological examinations, no evidence of bacterial invasion was detected in the postlarvae with brown nodules. The nodules were frequently formed in postlarvae that were starved for four days. The brown nodules in appendages disappeared after the postlarvae were transferred to a clean and less-densely reared aquarium. Furthermore, addition of formalin at 25ppm to the rearing water inhibited the formation of brown nodules, although the mechanism was not clear. These results suggest that the brown nodule formations in the appendages of the hatchery-reared postlarvae of *P. monodon* were probably caused by a combination of several factors related to water quality and feeding and not by bacterial infection.

Key word: *Penaeus monodon*, brown nodule formation, appendages necrosis

The Japan International Cooperation Agency and the Madagascar Government have conducted the project, Aquaculture Development Project in the Northwest Coastal Region, since 1998 to promote small-scale aquaculture of *P. monodon* among the fishermen in the Northwest Coastal Region. In this project, the transfer of technology has included the shrimp seed production, shrimp growout systems and pond management at the Centre de Developpement de la Culture de Crevettes (Center for the Development of Shrimp Culture : CDCC), which has two facilities, a hatchery and growing-out ponds in Mahajanga (**Fig. 1**). The hatchery produced more than 10 million postlarvae of *P. monodon* in the 2000 fiscal year.

Brown nodule formation in the postlarvae appendages, such as the pereopods, pleopods, and antennae, has been present since the beginning of the CDCC hatchery seed production in 1998. The for-

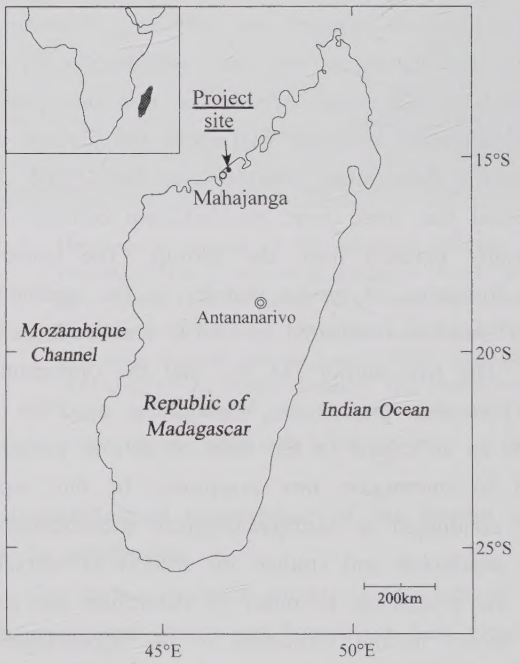


Fig. 1. Location of the project site in Mahajanga, Madagascar.

2002年3月13日受理 (Accepted on March 13, 2002)
水産総合研究センター業績 A 第12号 (Contribution No.A 12 from Fisheries Research Agency)
*[1]西海区水産研究所石垣支所 〒907-0451 沖縄県石垣市字浮海大田148-446 (Ishigaki Tropical Station, Seikai National Fisheries Research Institute, Ishigaki, Okinawa 907-0451, Japan)
*[2]国際協力事業団 〒151-8558 東京都渋谷区代々木2-1-1 (Japan International Cooperation Agency, Yoyogi, Tokyo 151-8558, Japan)
*[3]マダガスカルエビ養殖センター (Centre de Developpement de la Culture de Crevettes, Mahajanga B, P. 85, Madagascar)
*[4]現住所 西海区水産研究所企画連絡室 〒850-0951 長崎県長崎市国分町3-30 (Research Planning and Coordination Division, Seikai National Fisheries Research Institute, Nagasaki 850-0951, Japan)

mation ultimately leads to shrimp mortality. The symptoms were found in the postlarvae reared in 10-ton tanks with slightly dirty rearing water in which some protozoa were observed. The postlarvae with brown nodules were not actively swimming and usually had empty guts, meaning that they consumed very little. The CDCC seed production operation usually took place from April to January. Brown nodule formation was more frequently observed from November through January, when the water temperatures were higher, ranging from 28 to 30℃, than it was from July through September, when the water temperature ranged from 26 to 28℃. In practice, the addition of formalin to the rearing water tanks seemed to decrease the incidence of brown nodules in the cultured shrimp.

Brown nodule formation in the appendages resembles the symptoms of vibriosis, such as brown spot disease and appendage necrosis, which have been previously reported (Lightner, 1988 ; Lightner, 1996). It had been assumed that the brown nodule formation was caused by vibriosis. However, a causative bacterium was not microscopically observed in wet-mount specimens, and our preliminary bacterial isolation trial from the shrimp with brown nodules using marine agar and TCBS agar showed that there were no dominant colonies specifically isolated from the shrimp. The cause of the formation of brown nodules in the appendages of *P. monodon* cultured in CDCC remained unclear.

The first author (M. S.) had the opportunities to join this project in Madagascar in 1999 and 2000 as an expert in the field of shrimp pathology and to investigate this symptom. In this report, we conducted a histopathological examination of the postlarvae and studied the effects of starvation on the postlarvae in order to determine the cause of brown nodule formation in the appendages of hatchery-reared *P. monodon* postlarvae. To control the formation of the nodules, we examined the effects of adding formalin to the rearing water and transferring the affected shrimp to other clean tanks.

Materials and Methods

Histopathological observations of brown nodules in postlarvae

The postlarvae bearing brown nodules formed in the appendages were collected from 10-ton rearing tanks at the CDCC and fixed in Davidson's fixative solution (Bell and Lightner, 1988). These samples were processed for paraffin sections followed by H&E stain.

Induction of brown nodules in postlarvae by starvation

Eight-day old postlarvae (PL8) with no brown nodules were collected from a 10-ton rearing tank, and 25 individuals were transferred to two 30-liter aquariums with fresh seawater. One aquarium was prepared for the control group, which was fed 0.01 g of a commercial diet (No. 1, Maruha Corp.) twice a day, and the other aquarium was used for the starvation group, which received no feed. One half of the rearing water was exchanged with fresh seawater once a day. After they were reared for four days at 30℃, all shrimp were collected and microscopically examined for brown nodules.

Inhibitory effect of formalin on the occurrence of brown nodules in postlarvae

Twenty-five postlarvae of PL8 with no brown nodules were placed in two 30-liter aquariums. In one group, formalin was added to the aquarium rearing water at a concentration of 25ppm, and the other aquarium, used as a control group, was not supplemented. One half of the rearing water was exchanged with fresh seawater once a day, and formalin was added to one aquarium to maintain the level of concentration in the water. After both groups were starved for four days at 30℃, all shrimp were collected and examined for brown nodules.

Effect of transferring the affected shrimp to a less-densely populated aquarium

Two hundred postlarvae (PL8) with brown nodules were collected from a 10-ton rearing tank and divided into two groups. Each group was transferred to a 30-liter experimental aquarium with a rearing density that was 10-fold lower than that of the 10-ton tank. They were reared for three days at 31℃, receiving 0.04 g of a commercial feed (No. 1, Maruha Corp.) twice a day. One half of the rear-

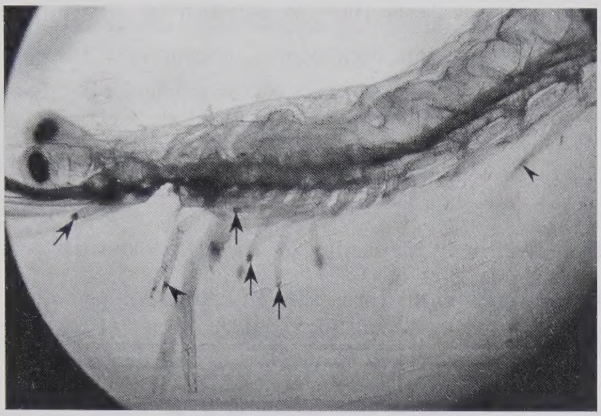


Fig. 2. *P. monodon* postlarva (PL5) cultured in CDCC showing brown nodule formation in the appendages. Small arrowhead and large arrowhead shows light-brownish nodule at the early stage and clear brown nodule, respectively. Arrows indicate loss of the apical part of the appendage. Note lack of guts contents.

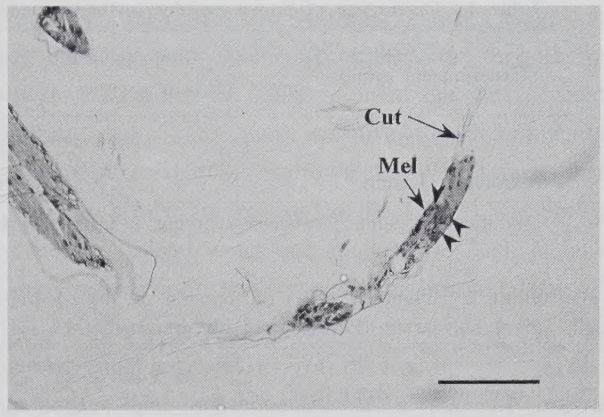


Fig. 3. Histological section of a brown nodule at the early stage in the *P. monodon* postlarva (PL9). The brown nodule at the tip of the 3rd pleopod showed a slightly melanized, hemocytic host reaction. Necrosis of the cuticular epithelium cells were seen (arrowhead). Cut : cuticle layer, Mel : melanization. H&E stain. Bar : 100㎛.

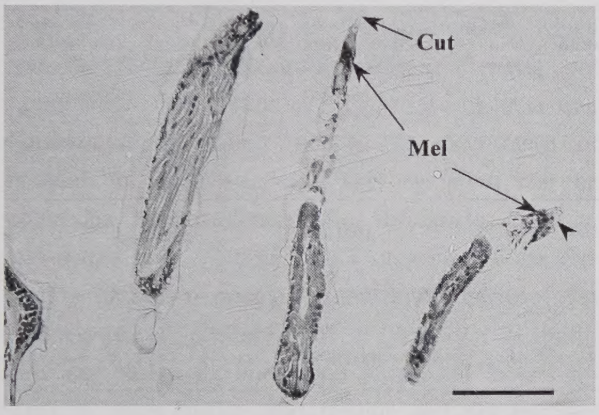


Fig. 4. Histological section of brown nodules in the *P. monodon* postlarva (PL9). Melanized, hemocytic nodules (Mel) were formed at the tip of the 4th and 5th pleopods, and the tip of the 5th pleopod was lost (arrowhead). Cut : cuticle layer. H&E stain. Bar : 100㎛.

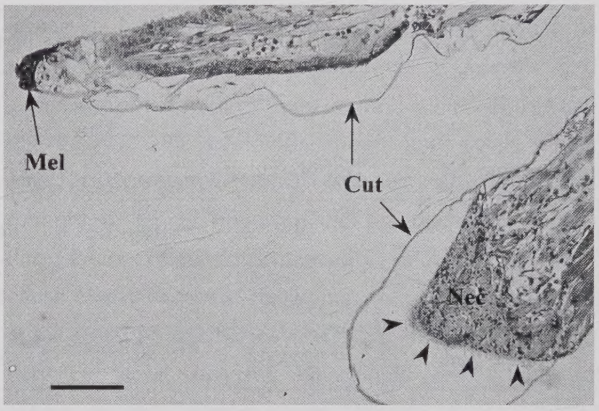


Fig. 5. Histological section of the pleopod infected with bacteria in the *P. monodon* postlarva (PL31) reared in a 10-ton tank in which mass mortality occurred. Note bacterial invasion (arrowhead) in the 3rd pleopod with necrotic muscle tissue (Nec) after rotting of a part of the brown nodule. The brown nodule (Mel) in the 2nd pleopod still remained. Cut : cuticle layer. H&E stain. Bar : 100㎛.

ing water was exchanged with fresh seawater once a day. Five individuals were collected daily from the 30-liter aquarium and from the 10-ton tank and examined for the formation of brown nodules in their appendages.

Results

Gross signs

In the 10-ton rearing tanks, the affected shrimp usually had empty guts. At the early stage, the tip of the appendage was seen as light brown, and then the brown nodule was clearly visible. The loss of the apical part of the appendage subsequently occurred (**Fig. 2**).

Histopathological observation of the brown nodules in postlarvae

The brown nodules found in the tips of appendages were melanized hemocytic host reaction. In the early stage, necrosis of the cuticular epithelium layer at the apical part of the appendage occurred, and a slightly melanized hemocytic nodule (**Fig. 3**) formed in the tip. Melanogenesis then progressed. Bacterial multiply and parasites were not observed in the tips of the appendages at this stage of the development of the nodule. Subsequently, the tips of the appendages were lost (**Fig. 4**). After a part of the brown nodule rotted, bacterial

Table 1. Occurrence of brown nodules in the appendages of *P. monodon* postlarvae (PL8) by starvation

Experimental group	Positive rate (%)* (No. of positive/No. of survival)	Survival rate (%) (No. of survival/No. of shrimp used)
Starvation	86.4 (19/22)	73.3 (22/30)
Control (feeding)	25.0 (7/28)	93.3 (28/30)

*: Significant difference between 2 groups (χ^2test, $P<0.001$).

Table 2. Inhibitory effect of formalin on the occurrence of brown nodules in the appendages of *P. monodon* postlarvae (PL8) caused by starvation

Experimental group	Positive rate (%)* (No. of positive/No. of survival)	Survival rate (%) (No. of survival/No. of shrimp used)
Formalin-treated	20.0 (5/25)	83.3 (25/30)
Control	80.8 (21/26)	86.7 (26/30)

*: Significant difference between 2 groups (χ^2test, $P<0.001$).

Table 3. Positive rate of brown nodules in the appendages of *P. monodon* postlarvae (PL8) after transfer to a less-densely populated aquarium

		Positive rate of brown nodules (No. of positive shrimp/No. of shrimp examined)				
		Days after transfer				
Aquarium No.	No. of shrimp	0	1	2	3	Survival rate (%)
1	100	100(5/5)	60(3/5)	40(2/5)	0(0/5)	90.6
2	100	100(5/5)	80(4/5)	40(2/5)	20(1/5)	71.8
10-ton tank	310000	60(3/5)	80(4/5)	60(3/5)	60(3/5)	71.0

invasion of the appendages occurred easily, and diffuse necrosis of the muscle tissue followed (**Fig. 5**), leading to shrimp mortality.

Induction of brown nodules in postlarvae by starvation

In four days, brown nodules occurred in appendages at a rate of 86.4% among the group that was starved and at a rate of 25.0% among the control (**Table 1**), which was a significant difference between the groups with $P<0.001$ (χ^2test). The nodules were severe in several appendages in the group that was starved, whereas the control group was only slightly affected. A microscopic examination revealed that the nodules formed in the shrimp from the group that was starved were the same as those in the shrimp that were cultured in the 10-ton rearing tanks. The survival rate was 73.3% and 93.3% in the starved and control groups, respectively. Cannibalism contributed to the low survival rate among the starved group.

Inhibitory effect of formalin on brown nodules in postlarvae

Brown nodules in the appendages occurred at rates of 20.0% and 80.8% in the formalin-treated and-untreated groups, respectively, after four days of starvation (**Table 2**). The survival rates were 83.3% and 86.7% in each respective group.

Effect of transferring the affected shrimp to a less-densely populated aquarium

The incidence of brown nodules in the appendages decreased daily in the two experimental groups and was 0% and 20% three days after being transferred (**Table 3**). The survival rates of the experimental groups were 71.8% and 90.6%. In contrast, the positive rate of the nodules in the

10-ton control tank did not change remarkably during the experimental period, and the incidence was high, ranging from 60% to 80%.

Discussion

Histopathological examinations revealed that the brown nodules formed in the appendages of the postlarvae of *P. monodon* that were cultured in the CDCC were a melanized hemocytic host reaction. The hemocyte inflammation and subsequent melanogenesis, which is known as a self-defense mechanism in crustacea (Wago, 1986), were probably induced by the necrosis of the epithelium in the apical part of the appendage. The histopathological examinations showed no evidence of bacterial and parasitic invasions in the postlarvae with the brown nodules in the appendages, which was the same as the results from the wet-mount examination and preliminary bacterial-isolation trial. Furthermore, starvation induced the occurrence of nodules in the postlarvae. This symptom can be controlled by transferring the shrimp to a clean, less-reared tank. These results suggest that the formation of brown nodules in the appendages of the hatchery-reared postlarvae of *P. monodon* is probably caused by a combination of several factors related to water quality and feeding and not by bacterial infection.

A limited incidence of brown nodules in the appendages occurred in the experimental shrimp of the control group which received feed. The cause of the occurrence was not clear, but we assume that there were underlying factor(s) causing the nodules in the shrimp cultured in the CDCC. The CDCC hatchery is located near an estuary of the Betsiboka River, which might influence the quality of the CDCC supplying water, especially from November to January, which is the beginning of the rainy season and higher temperatures. Salinity of supplying water was around 30 from November to January, but it was around 35 from July to September during dry season with lower temperatures. The occurrence of brown nodules in the 10-ton rearing tanks at the CDCC was more frequent from November to January than it was from July to September. Since *P. monodon* is comparatively tolerant to changes in temperature and salinity (Lester and Pante, 1992), it is unlikely that changes in temperature and salinity prompted the nodule to occur. Flegel *et al.*(1992) pointed out that penaeid shrimp larvae are quite sensitive to environmental conditions and toxic substances. We assume that the water used for rearing at the CDCC was influenced by inland water and might have been an underlying factor in the formation of the nodules.

Histopathological examinations showed that the brown nodules lead to rot of the tip of the appendages and subsequently of a part of brown nodules, which results in the invasion of bacteria such as vibrios. Therefore, the formation of brown nodules is a primary cause of vibriosis in the hatchery. There have been many reports in which the causative *Vibrio* species were isolated from moribund or dead penaeid shrimp larvae and postlarvae in hatcheries, and special attention should be given to luminous species, such as *V. harveyi* and *V. splendidus* (Lavilla-Pitogo *et al.*, 1990 ; Karunasagar *et al.*, 1998 ; Lapvilla-Pitogo and de la Pena, 1998). However, *Vibrio* species are generally thought to be an opportunistic pathogen and secondary cause of shrimp mortality in hatcheries, because these bacteria are a part of the normal bacterial flora in hatcheries and there is no correlation between larval survival and viable cell counts of *Vibrio* in the rearing water (Flegel *et al.*, 1992). Since melanogenesis occurs by the infection of *Vibrio* in organs of the penaeid shrimp, such as the gill, lymphoid organs, and appendages (Egusa *et al.*, 1988 ; Lightner, 1996), vibriosis are likely to be cited as the cause of mortality when brown spots are observed in the appendages of dead or moribund shrimp larvae and postlarvae. It is possible that brown nodules in the appendages of penaeid shrimp, which are similar to those reported in this study, occur at other hatcheries and are an underlying cause of vibriosis.

Formalin at 25ppm has been used as a practical treatment for brown nodules in shrimp reared in 10-ton tanks at the CDCC. The result lends support to the inhibitory effect of formalin on the formation of brown nodules, but the mechanism is not clear. Further study is needed to determine the mechanism of the inhibitory action of formalin on the formation of brown nodules in *P. monodon* postlarvae.

The affected postlarvae with brown nodules can be recovered after they were transferred to a clean tank with a less-dense population. Although many antibacterial compounds are used in shrimp hatcheries (Baticados *et al.*, 1990), the management of water quality is more important for controlling the occurrence of brown nodules than the administration of antibacterial drugs and chemicals, such as formalin.

Acknowledgments

The authors are grateful to Dr. Takeshi Hara of the Japan Fisheries Resource Conservation Association, who is the Management Consultation Team leader of The Aquaculture Development Project in the Northwest Coastal Region in Madagascar, for his encouragement and helpful comments. The first author (M. S.) wishes to thank the Ministere de la Peche et des Ressources Halieutiques du Madagascar, the Fisheries Agency of Japan, the Seikai National Fisheries Research Institute, the Japan International Cooperation Agency, and the Management Consultation Team of the project for the opportunity to conduct on-site research in Madagascar.

References

Baticados, M.C.L., Lavilla-Pitogo, C.R., Cruz-Lacierda, E.R., de la Pena, L.D., and Sunaz, N.A., 1990 : Studies on the chemical control of luminous bacteria *Vibrio harveyi* and *V. splendidus* isolated from diseased *Penaeus monodon* larvae and rearing water. *Diseases of Aquatic Organisms,* **9**, 133－139.

Bell, T.A.and Lightner, D.V., 1988 : A handbook of normal penaeid shrimp histology. World Aquaculture Society, Louisiana, 114pp.

Egusa, S., Takahashi, Y., Itami, T., and Momoyama, K., 1988 : Histopathology of vibriosis in the kuruma prawn, *Penaeus japonicus* Bate. *Fish Pathology,* **23**, 59－65.

Flegel, T. W., Fegan, D. F., Kongsom, S., Vuthikomudomkit, S., Sriurairatana, S., Boonyaratpalin, S., Chantanachookhin, C., Vickers, J. E., and Macdonald, O. D., 1992 : Occurrence, diagnosis, and treatment of shrimp diseases in Thailand, in "Diseases of cultured penaeid shrimp in Asia and the United States" (ed. by Fulks, W. and Main, K. L.), The Oceanic Institute, Hawaii, pp.57－112.

Karunasagar, I., Otta, S. K., and Karunasagar, I., 1998 : Disease problems affecting cultured penaeid shrimp in India. *Fish Pathology,* **33**, 413－419.

Lavilla-Pitogo, C.R., Baticados, M.C.L., Cruz-Lacierda, E. R., and de la Pena, L.D., 1990 : Occurrence of luminous bacterial disease of *Penaeus monodon* larvae in the Philippines. *Aquaculture,* **91**, 1－13.

Lavilla-Pitogo, C.R.and de la Pena, L.D., 1998 : Bacterial diseases in shrimp (*Penaeus monodon*) culture in the Philippines. *Fish Pathology,* **33**, 405－411.

Lester, L. J.and Pante, M. J., 1992 : Penaeid temperature and salinity responses, in "Marine Shrimp Culture : Principles and Practices" (ed. by Fast, A. W. and Lester, L. J.), Developments in Aquaculture and Fisheries Science, Vol. 23, Elsevier, Amsterdam, pp.515－534.

Lightner, D.V., 1988 : Vibrio disease of penaeid shrimp, in "Disease Diagnosis and Control in North American Marine Aquaculture" (ed. by Sindermann, C. J. and Lightner, D. V.), Developments in Aquaculture and Fisheries Science, Vol. 17, Elsevier, Amsterdam, pp.42－47.

Lightner, D. V., 1996 : Vibriosis-histological diagnostic techniques, in "A handbook of shrimp pathology and diagnostic procedures for diseases of cultured penaeid" (ed. by Lightner, D. V.), The World Aquaculture Society, Louisiana.

Wago, H., 1986 : Host defense mechanism of invertebrates from the phylogenetic viewpoint. *Protein, Nucleic acid, and Enzyme,* **31**, 886－903 (in Japanese).

水研センター研報，第3号，7－26，平成14年
Bull. Fish. Res. Agen., No. 3, 7－26, 2002

ツノナシオキアミ漁業の変遷及び漁況の特徴について

瀧　憲司*

Annual variations in the conditions of fisheries for *Euphausia pacifica* in Sanriku and Joban waters, northeastern Japan.

Kenji TAKI*

Abstract The relationship between annual variations in the ocean environment and the trends and conditions of the fisheries for *Euphausia pacifica* in Sanriku (Iwate and Miyagi prefectures) and in Joban (Fukushima and Ibaraki prefectures) waters were examined.

The history of the fishery was classified into four time periods. During the first period, a small-scale fishery was conducted along the coastal waters off Miyagi Pref. beginning in the mid-1940's. During the second period, the fishing grounds were extended throughout the Sanriku and Joban waters and the annual total catch increased substantially beginning in the late-1960's. During the third period, the main fishing grounds shifted to the Sanriku waters beginning in the late-1980's. During the fourth period, the total catch has been regulated from the early-1990's.

Along the coastal waters of Iwate Pref., the fisheries seem to be independent of the oceanographic conditions in this region and no apparent relationship between the CPUE (catch/boat day) and annual variations in the oceanographic conditions was found. Along the coastal waters of Miyagi Pref., however, unfavorable conditions for the fishery are correlated with the northward anomaly of the southern limit of the first branch of the Oyashio Current (FOI). Along the Joban coastal waters, it was suggested that the southernmost extent of the FOI is an important factor in controlling the fishery conditions.

Key word: *Euphausia pacifica*, fishery, Oyashio, CPUE

三陸（岩手県及び宮城県）及び常磐（福島県及び茨城県）沿岸域では，毎年冬春季にツノナシオキアミを対象とした漁業が行われている。1992～2001年の10年間における年間総漁獲量は，平均6万6千トン，年間総生産金額は，平均31億円で，沿岸漁業として重要な位置づけにある。

ツノナシオキアミの漁獲量及び漁期は，年変動が大きいうえ，海域間の差が顕著である。また，これに伴って価格の年変動や海域間の差が大きいため，生産者及び流通加工業者から安定生産と流通の保持に向けた適正な資源評価並びに漁況予測が望まれてきた。そのため，これまでにも漁況と海況との関係やこれに基づいた漁況予測手法に関する研究が行われてきた。小達（1979）は，親潮系冷水域面積とツノナシオキアミの総漁獲量との間に高い相関があることを示し，親潮系冷水の南下の強弱がツノナシオキアミの漁獲量に強く影響していることを示唆した。小谷（1992）は，漁期前の親潮第一分枝の位置と親潮第一分枝年間最南下緯度及び親潮第一分枝年間最南下緯度と海域別漁獲量との間で回帰式を求め，漁期前の親潮第一分枝の位置から直接海域別漁獲量を予測する手法を開発した。また，漁期前の親潮系冷水の位置から海域別初漁日を予測する手法も提唱している。

一方，ツノナシオキアミ漁業の変遷をみると，1960年代後半以降，養殖業の振興と遊魚の普及による需要の伸びに対応して漁獲努力量が著しく増加した。ま

2002年3月13日受理（Accepted on March 13, 2002）
水産総合研究センター業績 A 第13号（Contribution No.A 13 from Fisheries Research Agency）
* 東北区水産研究所　〒985-0001　宮城県塩釜市新浜町3-27-5（Tohoku National Fisheries Research Institute, 3-27-5 Shinhama, Shiogama, Miyagi 985-0001, Japan）

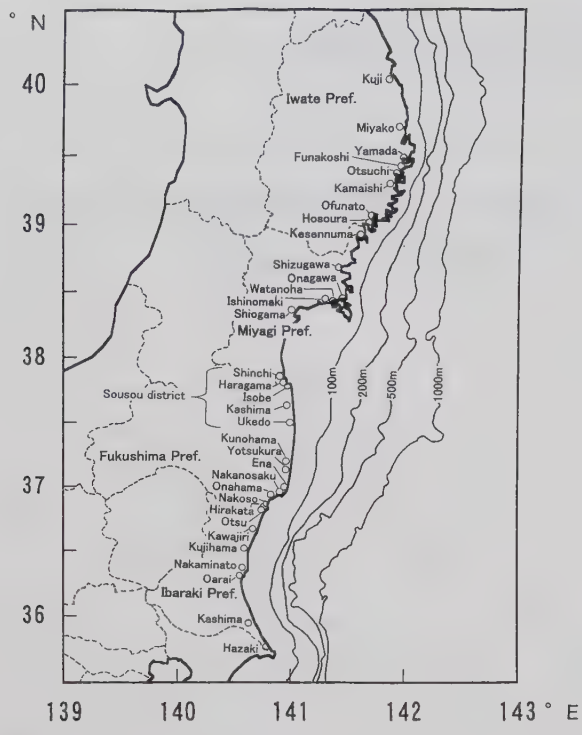


Fig. 1. Map of northeastern Japan indicating the landing ports of *E. pacifica*.

た,1980年代終わりから1990年代初めにかけて，岩手県及び宮城県において抄網漁法から船曳網漁法への変更が行われるなど，漁獲効率が著しく向上した。さらに，1993年以降は，過剰生産による価格低下を防ぐため,漁期や総漁獲量についての生産調整が強化された。従って，漁況の経年変動には，生物・環境要因による資源量変動や海況変動に起因する漁場形成の動向等自然的要因のほか，このようなツノナシオキアミ漁業を取り巻く社会・経済情勢の変化が大きく関わっていると考えられる。そこで本研究では，漁獲量やCPUE等の漁況に関する指標及び親潮第一分枝の南限緯度等漁況と関係する海況指標の時系列データを可能な限り長期にわたって解析し，その経年的変動の特徴を明らかにするとともに漁法，漁労技術及び漁獲量規制等，漁業形態の歴史的変遷を整理した。これらの結果に基づいて，海況変動がツノナシオキアミ漁業の変遷にどのように関わってきたか，また，各海域の漁場形成にどのような影響を及ぼしているのかについて検討した。

資料と方法

本研究に用いた主な資料は，全国漁業協同組合連合会東北支所（以降，全漁連と略す）による**Fig. 1**に示した水揚港別の漁獲量，水揚隻数並びに平均単価の日報値，及び各県水産試験研究機関（岩手県水産技術センター，宮城県水産研究開発センター，福島県水産試験場及び茨城県水産試験場）によって集計された県別の年間生産額，年間平均単価，旬別・年別の漁獲量，延水揚隻数，CPUE（1日1隻当たり漁獲量）である。これらの資料を用いて，**Table 1**に示した今回の解析に用いる水揚港別及び県別の漁業データを作成した。

水揚港別データにおける1984～2001年の水揚量及び水揚日数は，それぞれ全漁連の日報値及び同資料による水揚日を集計して求めたが，日報が欠損している年や期間については，県水産試験研究機関が調べた値を用いた。また,1984～2001年における延水揚隻数,1日当たり水揚隻数及びCPUEも全漁連の日報に基づいて計算した。なお，全漁連の日報では水揚日の一部において水揚隻数の記録が欠落していることがあったため，それぞれ**Table 1**に示した方法で推定した。

県別データにおける1984～2001年の生産額及び単価については，県水産試験研究機関によって集計された値を優先して用いたが，これらが欠損している年については，全漁連の日報値を集計した値を用いた。1984～2001年の延水揚隻数については，県水産試験研究機関によって集計された値を優先して用いたが，これが欠損している年については，全漁連の日報に基づく水揚港別延水揚隻数を集計した値を用いた。1971～2001年の漁獲量については，県水産試験研究機関によって集計された値を優先して用いたが，これが欠損している年については，小達（1991）の値を用いた。1984～2001年の水揚日数は，全漁連の日報による水揚日を集計した値を用いたが，これが欠損している年や期間については,県水産試験研究機関が調べた値を代用した。1984～2001年の1日当たり水揚隻数及びCPUEは，延水揚隻数，水揚日数及び漁獲量をもとに計算した。なお，CPUEの計算に際しては，漁獲量及び延水揚隻数のデータは，同一機関のものを用いた。すなわち，延水揚隻数において全漁連の日報に基づく水揚港別延水揚隻数を集計した場合，漁獲量についても同資料の水揚港別漁獲量を集計した値を用いた。

そのほか，1975～1983年の全国平均単価については，全漁連によって集計された値を用いた。また，各年の漁況や生産調整の経過については漁業情報サービスセンター発行の太平洋漁海況速報を参照した。さらに，漁業の沿革については，主に小達（1991）のツノナシオキアミ漁業の総説を参照するとともに各県水産試験研究機関，全漁連，各県漁業協同組合連合会，漁業者及び加工業者から聞き取り調査して得た情報を総合的に整理した。

三陸・常磐沿岸域における旬毎の表面水温値（1981～2001年）として，漁業情報サービスセンターが太平洋漁海況速報より三陸沿岸域(北緯38－41度，東経142

Table 1. Reference and method of estimation of the fishery data

	Data	period	Reference and method of estimation
Port	Catch	'84～'01	From FUA[*1] except '96 and '00 for Ibaraki and a part of '97 for Iwate from PRF[*2].
	Fishing days	'84～'01	Same as above.
	No. of boats	'84～'01	(*Fishing days*) (*Fishing days no. of boats available*[*3]) × (*Available no. of boats*)
	No. of boats per day	'84～'01	(*Available no. of boats*) (*Fishing days no. of boats available*)
	CPUE	'84～'01	(*Total catch over the days no. of boats available*) / (*Available no. of boats*)
Prefecture	Price	'84～'01	Iwate : From PRF except '84—'91 from FUA. Miyagi : From PRF except '84 from FUA. Fukushima : from PRF. Ibaraki : From PRF except '84—'91 from FUA.
	Catch	'71～'01	Iwate : From PRF except '75～'88 from Odate (1991). Miyagi : From PRF except '71～'84 from Odate (1991). Fukushima : From PRF. Ibaraki : From PRF except '72～'76 from Odate (1991).
	Fishing days	'84～'01	From FUA except '96 & '00 for Ibaraki and a part of '97 for Iwate from PRF.
	No. of boats	'84～'01	Iwate : From PRF except '84－'91and '99 estimated by summing up the no. of port boats (estimated on the third item of this table) over pref. from FUA. Miyagi : From PRF except '84 estimated by summing up the no. of port boats over pref. from FUA. Fukushima : From PRF except '84—'86 estimated by summing up the no. of port boats over pref. from FUA. Ibaraki : From PRF except '84—'91 estimated by summing up the no. of port boats over pref. from FUA.
	No. of boats per day	'84～'01	(*No. of boats*) (*Fishing days*)
	CPUE	'84～'01	(*Catch*) (*No. of boats*) but, if (*No. of boats*) was estimated from FUA as shown on the ninth item of this table, any (*catch*) is estimated by summing up the no. of port boats over each pref. from FUA.

*[1]Daily reports from the National Federation of Fisheries Co-operative Associations, Tohoku Branch from 1984 to 2001 (except for Ofunato). Fishery data for Ofunato from 1984 to 1991 referred to from the daily reports of the Ofunato Fishery Market.

*[2]Data of the Iwate Prefectural Fisheries Technical Center, Miyagi Prefecture Fisheries Research and Development Center, Fukushima Prefectural Fisheries Experimental Station and Ibaraki Prefectural Fisheries Experimental Station.

*[3]The port catch was always recorded on the fishing day, but the no. of port boats was sometimes not recorded on the same day on FUA or PRF ('96 of Iwate)

－143度の海域及び北緯38－38.5度，東経142以西沿岸までの海域）及び常磐沿岸域（北緯36－38度，東経141－142度の海域）において緯経度30分間隔で読みとった表面水温の平均値を用いた。また，月毎の親潮第一分枝南限緯度（1971～2001年）は，東北区水産研究所発行の東北海区漁場海況概報（1999～2001年は未発行）から読みとった。

結　　果

漁業の沿革

ツノナシオキアミ漁業は，1940年代中頃に宮城県牡鹿半島周辺で始まり，それまでメロード（イカナゴの成魚）漁業に用いられてきた抄網漁法によって海面付近の浮上集群を漁獲した（小達，1991）。1953年以降女川港における漁獲統計資料が残されているが，それによると，1960年代までは，地元を中心とする食用や餌料としての需要しかなく，三陸の海に春を告げる風物詩的営みに過ぎなかった。

しかし，1960年代後半になると，タイ養殖漁業の振興や遊魚の普及によって需要が拡大し，1970年代初めには宮城県沿岸全域に漁場が拡がった。さらに，1972年には茨城県，1974年には福島県，1975年には岩手県で漁業が開始された（**Table 2**）。

漁獲したツノナシオキアミは，1975年以前には手網で抄って魚鎗に入れて氷蔵したり，竹籠で持ち帰っていたが，1975年から茨城県で開発された30kg入りプラスチック製コンテナに収容する方法に変わり，鮮度保持方法の大幅な改善が図られた（小達，1991）。また，1970年代後半から1980年代には，漁網からツノナシオキアミを動力ポンプで吸い揚げて直接コンテナに収納するフィッシュポンプの導入，魚群探知機の導入，漁船の高速化及び網揚げ用ボールローラの大型化が図られた。常磐沿岸域では漁業開始時から船曳網漁法が用いられてきたが，1970年代には主にツノナシオキアミ浮上集群を漁獲対象とした。しかし，1980年頃から海底付近の低水温域に生息する底付群を対象とした漁場が開発され，漁具・漁法の改良・改善の後，1985年頃から本格的に操業が行われるようになった(石川，1990)。また，岩手県では，1980年頃までは殆ど抄網漁法を用いていたが，宮城県のような抄網漁法専用の船型でなく兼業のイカ釣り船を用いたため，漁獲効率が低かった。しかし，1980年頃から船曳網漁法を用い始め，1980年代終わりには，県内全て船曳網船に転換したと考えられている（湊，私信）。宮城県では伝統的な抄網漁法のみを1990年まで採用していたが，1991年からは船曳網漁法を許可・導入し，翌1992年にかけて抄網船からの積極的な転換が図られ，現在では船曳網船が主流となっている。このように，漁労技術の発達や新漁法の導入によって漁獲効率は近年段階的に向上し，1991年にはほぼ確立した。

以上のように，現在宮城県では抄網漁法と船曳網漁法，その他の3県では船曳網漁法のみを用いている。抄網漁法は，船首に叉手網を設定して表層曳きする方法であり，船曳網漁法は，中層を曳網する方法である。漁期は概ね2～6月であるが，常磐沿岸域では，近年の底付群漁場の開発により，年によっては7月下旬頃まで操業が行われる。主漁期は，三陸沿岸域では3～4月，常磐沿岸域では4～5月にある。漁場は，距岸10～20海里以内の水深200m以浅の大陸棚上であり，早朝に出漁して午後に水揚げする日帰り操業である。曳網水深は，三陸沿岸域では0～50mであるが，常磐沿岸域では底付群を対象とするため，最も深い所では水深150mの海底において着底曳網を行っている。

ツノナシオキアミ漁業は，岩手県，宮城県，福島県及び茨城県の県知事の許可によって，20トン未満の小型船を用いて営まれている。許可条件には，操業期間，入港または操業時間，操業区域，船舶の大きさなどが定められており，各県によって異なっている。一方，漁業者自身の協議によって生産調整が図られている（**Table 3**）。岩手県では1990年から，主に操業の安全性確保を目的として，船舶の大きさに応じて1日1隻当たりの籠（コンテナ）数制限が行われている。具体的には9トン船以上と9トン船未満にわけた7段階の漁獲制限が設けられ，漁期前に決定されるとともに漁期中の市場動向に応じて変更されている。宮城県では，1991年に船曳網漁法による漁獲が許可されたことを契機に，毎年「生産調整事項」が取り決められ，1日1隻当たり漁獲量を9トン（300籠）前後に制限している。福島県と茨城県では，1989年に単価の暴落を避けるため入港時間の設定や1日1隻当たりの籠数制限等の生産調整が行われたことを契機に，以降毎年生産調整が行われており，1日1隻当たり漁獲量を6トン（200籠）に制限している。さらに，1993年には岩手県と宮城県，1994年には福島県と茨城県を含めた4県の漁業協同組合で協議し，各県の漁獲量の上限枠を決定した。以降毎年漁期前に総量規制が設けられ，県毎の漁獲上限枠が定められている。

近年の三陸・常磐沿岸域における海況の経年変化

1971～2001年における親潮第一分枝南限緯度の時系列（**Fig. 2**）をみると，1971, 1980, 1983, 1988年を除き，年間最南下緯度がツノナシオキアミ漁期中の2～7月の間に出現した。データの整理を行った1960年以降の2～7月における親潮第一分枝の最南下月の先端緯度（以下，最南下緯度と略す）を緯度の低い順に並べると，上位1／3が35.4～37.7°N，中位1／3が37.8～38.7°N，下位1／3が38.8～39.9°Nにあった。そこで，1971年以降最南下緯度が37.7°N以南にあった年を南偏型，37.8～38.7°Nにあった年を中位型，38.8°N以北にあった年を北偏型と定義すると，1973, 1974, 1977, 1978, 1981, 1982, 1984, 1986, 1989, 1992, 1993, 1994, 1998年は南偏型、1975, 1979, 1983, 1987, 1988, 1995, 2001年は

Table 2. Development and regulation of the *E. pacifica* fishery

	Along the Sanriku coastal waters (Iwate & Miyagi)	Along the Joban coastal waters (Fukushima & Ibaraki)
1970	Fishery grounds expanded from north to south along the coastal waters of Miyagi.	Fishery commenced with using seine boats along the coastal waters of Ibraki (1972).
		Fishery commenced with using seine boats along the coastal waters of Fukushima (1974).
1975	Fishery commenced using dip nets in Iwate (1975). Fish-pumps were introduced in Miyagi.	Plastic containers were introduced in Ibaraki.
	Hydroacoustics were introduced.	Hydroacoustics were introduced.
1980	Seine boats were introduced along the southern coastal waters of Iwate.	Benthopelagic swarms were targeted for the first time along the coastal waters of Ibaraki.
1985		Benthopelagic swarms were commonly targeted.
	Seine boats were commonly adopted along the whole coastal waters of Iwate.	
1990	Fishermen in Iwate began to set self-regulation on the max.no.containers per boat (1990). Seine boats were permitted and adopted in Miyagi Pref. (1991). Fishermen in Miyagi began to set self-regulation restrictions (1991). Fishermen began to set self-regulation restrictions on the total catch for each pref. (1993).	Fishermen set self-regulation restrictions on the landing time and the max.no.of containers per boat (1989).
1995		Fishermen began to set self-regulation restrictions with those of Sanriku on the total catch for each pref. (1994).

中位型, 1972, 1976, 1980, 1985, 1990, 1991, 1996, 1997, 1999, 2000年は北偏型と分類される。

一方, 1981年以降の2～7月における三陸・常磐沿岸域の表面水温をみると, 同期間における親潮第一分枝の南下の度合いと表面水温の低下の度合いは, 必ずしも一対一に対応していなかった。すなわち, 親潮第一分枝南偏型の年のうち、1981, 1984, 1986, 1998年は三陸及び常磐沿岸域とも平年より顕著な低温であったが, 1982年は三陸沿岸域において低温傾向で常磐沿岸域で平年並み, 1992年と1994年は両海域とも平年並み, 1993年は三陸沿岸域において平年並みで常磐沿岸域において低温傾向, 1989年は三陸沿岸域において平年並みで常磐沿岸域において高温傾向であった。また, 中位型の年のうち, 1983年は三陸沿岸域において平年並みで常磐沿岸域においてやや低温傾向, 1987年は三陸沿岸域において低温傾向で常磐沿岸域において平年並み, 2001年は両海域とも顕著な低温傾向, 1988年と1995年は三陸沿岸域において平年並みで常磐沿岸域

Table 3. Regulatory measures on the *E. pacifica* fishery from 1993 to 2001

	Iwate	Miyagi	Fukushima	Ibaraki
1993	①25,000t ②12t per boat＞9 t 9 t per boat＜9 t ③1 Feb.－30Apr.	①Bs*1：21,000t, Dn*2：4,000t ②10.5t per boat＞15t 9.6t per boat＝10－15t, 9t per boat＜9 t ③Bs：22Feb.－30 Apr., Dn：1 Feb.－31 May	①No regulation ②6 t *③1 Feb.－31 Jul.*	①No regulation ②6 t *③11 Feb.－31 Jul.*
1994	①28,500t ②15t per boat＞9 t 11.4t per boat＜9 t *③All year round*	①28,500t Minimum guarantee for Dn：2,000t ②10.5t per boat＞15t 9.6t per boat＝10－15t, 9t per boat＜9 t ③Bs：20 Feb.－30 Apr., Dn：1 Feb.－30 Apr.	①10,500t ②6 t *③2/1～7/31*	①10,500t ②6 t *③2/11～7/31*
1995	①28,500t ②15t per boat＞9 t 11.4t per boat＜9 t *③All year round*	①31,000t Minimum guarantee for Dn：4,000t ②9 t per boat＞10t, 8.4t per boat＜10t ③Bs：1 Mar.－30 Apr., Dn：1 Mar.－13May	①10,500t ②6 t *③2/1～7/31*	①10,500t ②6 t *③2/11～7/31*
1996	①28,500t ②15t per boat＞9 t 11.4t per boat＜9 t *③All year round*	①32,500t Minimum guarantee for Dn：4,000t ②9.6t per boat＞10t, 9t per boat＜10t ③Bs：15Feb.－13May, Dn：1 Mar.－11May	①10,500t ②6 t *③2/1～7/31*	①10,500t ②6 t *③2/11～7/31*
1997	①28,500t ②12t per boat＞9 t 9 t per boat＜9 t *③All year round*	①32,500t Minimum guarantee for Dn：4,000t ②10.5t per boat＞10t, 9.9t per boat＜10t ③Bs：75days from the first fishing day Dn：1 Feb.－30 Jun.	①10,500t ②6 t *③2/1～7/31*	①10,500t ②6 t *③2/11～7/31*
1998	①30,000t ②12t per boat＞9 t 9 t per boat＜9 t *③All year round*	①32,500t Minimum guarantee for Dn：4,000t ②10.5t per boat＞10t, 9.9t per boat＜10t ③Bs：75days from the first fishing day Dn：25 Feb.－31 May	①10,500t ②6 t *③2/1～7/31*	①10,500t ②6 t *③2/11～7/31*
1999	①29,000t ②10.5t per boat＞9 t 8.25t per boat＜9 t *③All year round*	①29,000t Minimum guarantee for Dn：200t ②10.5t per boat＞10t, 9.9t per boat＜10t ③Bs：75days from the first fishing day Dn：1 Mar.－31 May	①10,500t ②6 t *③2/1～7/31*	①10,500t ②6 t *③2/11～7/31*
2000	①29,000t ②7.5t per boat＞9 t 6 t per boat＜9 t *③All year round*	①29,000t Minimum guarantee for Dn：200t ②10.5t per boat＞10t, 9.9t per boat＜10t ③Bs：1 Mar.－13 May, Dn：21 Feb.－23 May	①9,000t ②6 t *③2/1～7/31*	①9,000t ②6 t *③2/11～7/31*
2001	①22,500t ②7.5t per boat＞9 t 6 t per boat＜9 t *③All year round*	①22,500t ②9 t per boat＞10t, 7.8t per boat＜10t ③Bs：1 Mar.－14 May, Dn：1 Mar.－14 May	①7,000t ②6 t *③2/1～7/31*	①7,000t ②6 t *③2/11～7/31*

①：Total catch, ②：Max. no. of landings per boat, ③：Fishing period
②&③were alternated adapting to the fishery and market conditions during the fishing period.
Italics：licenses beeing issued by the prefectural govenor
*1Seine boats, *2Dip net

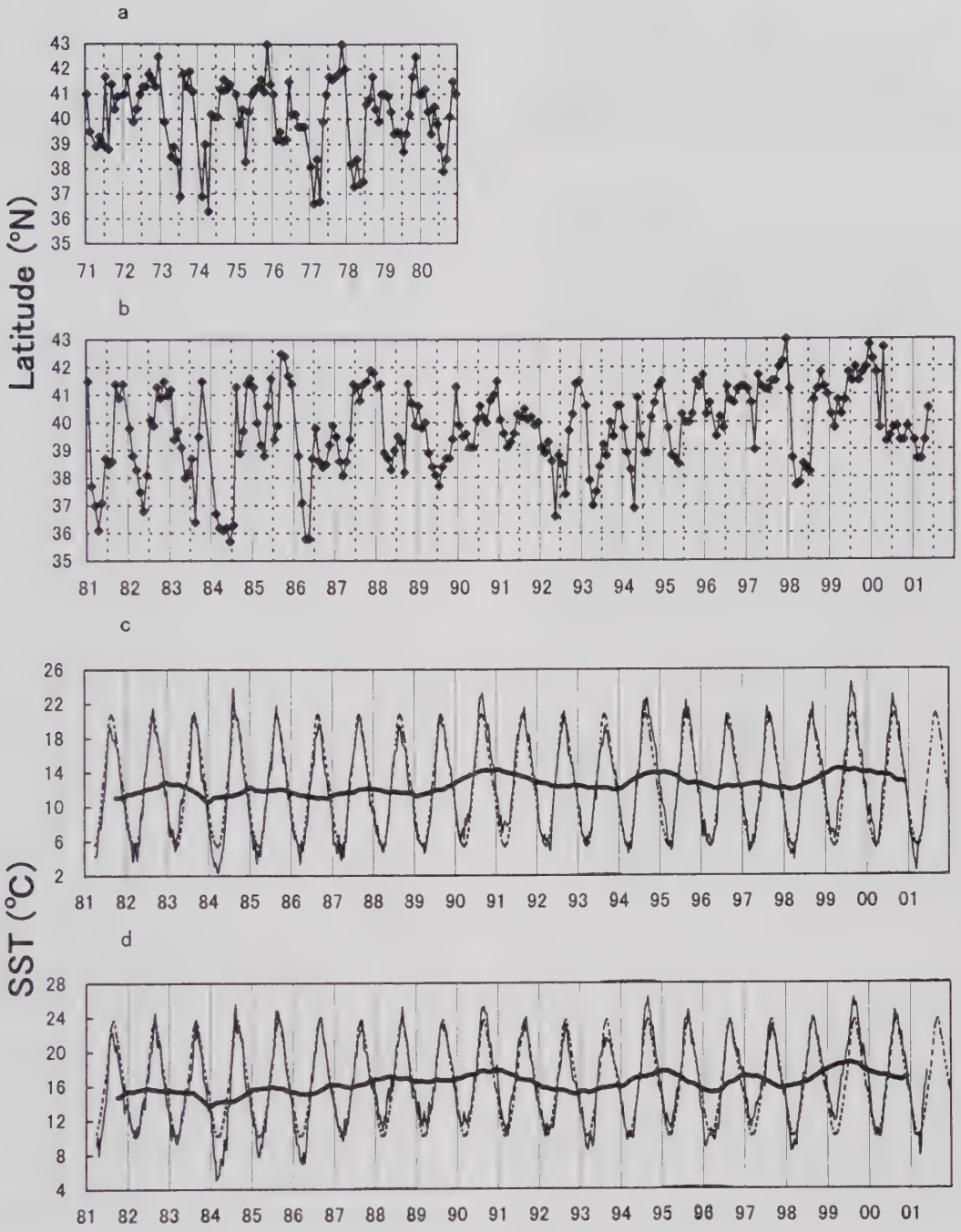


Fig. 2. The southern limits of the first branch of the Oyashio Current (FOI) from 1971 to 1980 (a) and from 1981 to 2001 (b), and the surface water temperature (SST) in the Sanriku (c) and Joban (d) waters. The southern limits of FOI are based on the data from the Tohoku National Fisheries Research Institute. SST is based on data from the Japan Fisheries Information Service Center. The solid thin lines, broken thin ones and solid thick ones in (c) and (d) show the raw data, mean values of the last 21 years and the 12-month running mean, respectively.

において高温傾向にあった。さらに，北偏型の年のうち、1990年と1999年は両海域とも高温傾向にあったが,1991年は三陸沿岸域において高温傾向で常磐沿岸域において平年並み,1996年は三陸沿岸域において平年並みで常磐沿岸域において低温傾向,1997年は三陸沿岸域において平年並みで常磐沿岸域において高温傾向,2000年は両海域とも平年並み,1985年は両海域とも顕著な低温傾向であった。

したがって,2～7月の表面水温の指標からは，三陸沿岸域では1983年を除く1981～1987,1998,2001年は低温傾向,1983,1988,1989,1992～1997,2000年は平年並み,1990,1991,1999年は高温傾向の年に分類される。

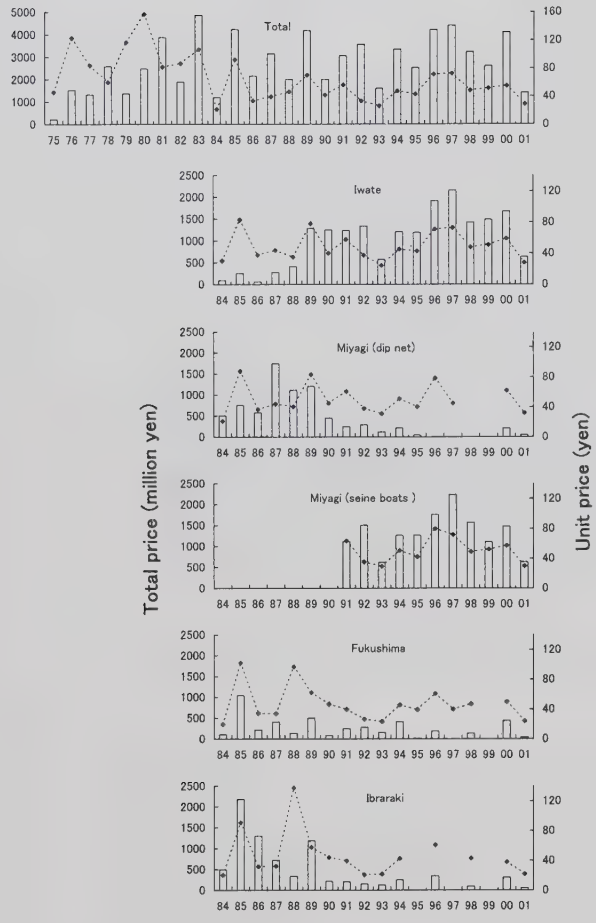


Fig. 3. Annual variations in the total price (bars) and unit price (broken lines) of *E. pacifica* fishery in each prefecture.

一方，常磐沿岸域では，1981，1983～1986，1993，1996，1998，2001年は低温傾向，1982，1987，1991，1992，1994，2000年は平年並み，1988～1990，1995，1997，1999年は高温傾向に分類される。

なお，1984～2001年の最南下緯度と各沿岸域表面水温の年間最低値との相関係数を求めたところ，三陸沿岸域では0.54（$P<0.05$），常磐沿岸域では0.59（$P<0.01$）で，有意であったが，高くはなかった。

生産金額と平均単価

1975～2001年の年間総生産額は，顕著な経年変動を示した（**Fig. 3**）。1975年以降増加傾向を示し，1983年に4,859百万円と最高に達し，1985，1989，1996，1997，2000年にも4,000百万円を上回ったが，1984，1993，2001年には2,000百万円を大幅に下回った。4県合計の平均単価（円/kg）も顕著な経年変動を示したが，とりわけ1984年まで変動が大きく，1976年に123円，1980年に最高の157円，1983年に107円と高額を示した一方で，1978年に60円，1981年に82円と安価を示し，1984年には最低の21円になった。1985年以降はそれまでより低水準に推移し，変動幅も相対的に小さくなった。これは，後述のように，1984年以降総漁獲量が概ね5万トンを越え，需要を大きく下回ることがなくなったためと考えられる。また，総量規制により総漁獲量が6万トン前後に定められた1993年以降は，年間総生産額と同様な経年変動を示し，2001年の29円を除き，極端に単価が安くなることはなかった。1993年以前については，1976，1980；1985年のような不漁の年には単価が高くなり，1978，1981，1984年のような好漁年や1993年のような好漁年の翌年には単価が安くなる傾向がみられた。また，30円未満と極端に低下した1984年と2001年では，このことが三陸・常磐沿岸域の終漁を促し，漁期を短くした。

1984年以降の県別の年間生産額をみると，岩手県では1987年から1989年にかけて急激に増加して，1989年には1,282百万円に達し，以降概ね高水準に経過したが，1996年と1997年はそれぞれ1,920百万円及び2,160万円と特に高額であった。宮城県の抄網船では，1987年の1,745百万円を最高に，以降1991年にかけて激減し，1991年以降は300百万円を下回って推移した。一方，宮城県の船曳網船では，同県における1991年の導入以降，1984～1990年の抄網船による生産額の水準（平均908百万円）をほぼ上回って推移し，岩手県と同様に1996年と1997年においてそれぞれ1,760百万円及び2,239百万円と高額であった。福島県と茨城県では，1985年にそれぞれ1,040百万円と2,177百万円と最も高額を示した後，1990年以降は500百万円を下回って推移した。このように1984～1988年には宮城県の抄網船，福島県及び茨城県の合計金額が総生産額の大半を占めたが，1991年以降は岩手県及び宮城県の船曳網船の合計金額が総生産額の大半を占めた。

年間平均単価は，各県において大きな経年変動を示したが，とりわけ1988年以前の福島県と茨城県において著しく，茨城県では，1984年の21円に対し1988年は138円と約6倍となった。また，1988年においては県間の格差も大きく，岩手県では35円と茨城県と100円以上の差がみられた。この年，茨城県において高額となったのは，4月末に三陸沿岸域で終漁した後，6月中旬になって初めて常磐沿岸域で漁場が形成され，需要が増大したことによると考えられている（小達，1991）。1989年以降は，福島県及び茨城県において，それまでより低水準に推移するとともに岩手県及び宮城県と同様な経年変動を示すようになった。これは，後述のように，1989年以降岩手県における漁獲量の増大等によって常磐沿岸域の漁獲量の全体に占める割合が低下し，それに伴って需要が常磐沿岸域において減少した一方で，三陸沿岸域において増大し，単価が岩手県と宮城県の漁獲量によって左右されるようになったため

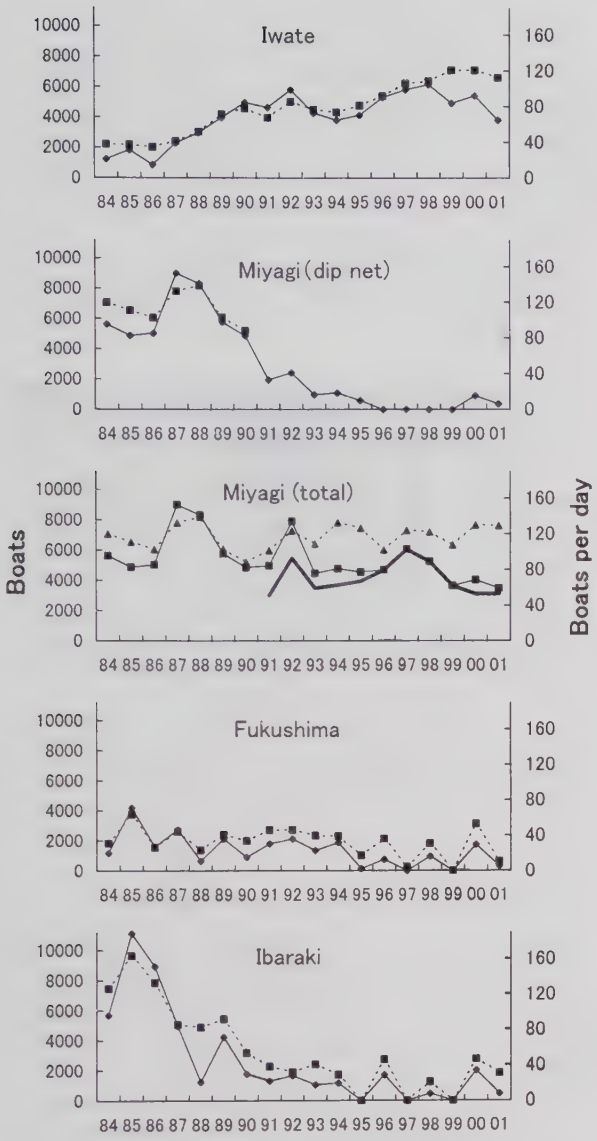


Fig. 4. Annual variations in the number of boats (solid line) and the number of boats per day (broken line) in each prefecture. Thick line shown on the graph of Miyagi (total) indicates the number of boats using seine nets in Miyagi.

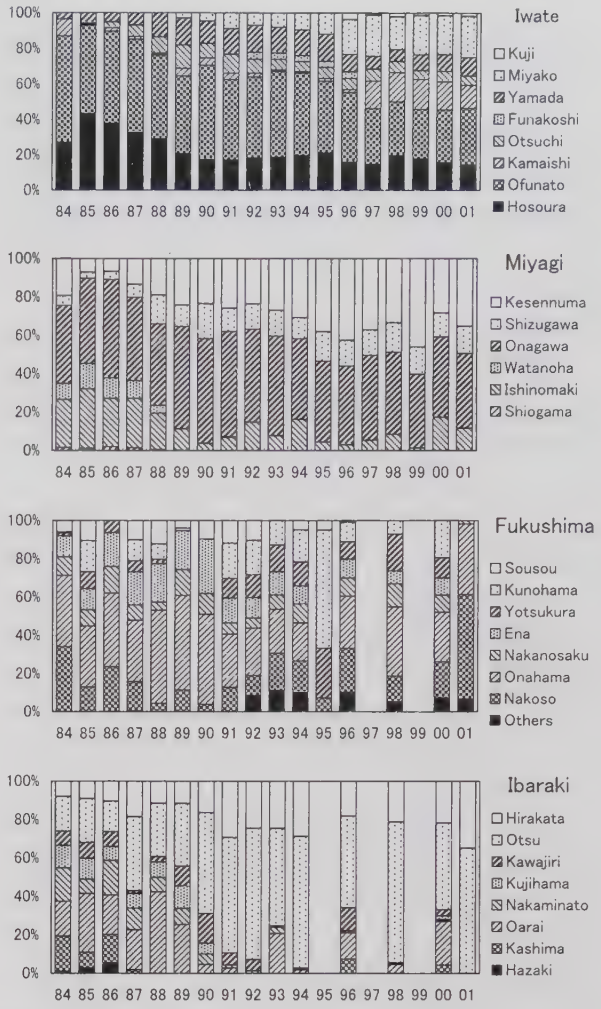


Fig. 5. Annual variations in the percentage composition of the number of boats from each port in each prefecture.

と考えられる。1991～2001年の平均は，岩手県では49円，宮城県抄網船では49円，宮城県船曳網船では51円，福島県では40円，茨城県では36円であった（福島県と茨城県については，漁獲のなかった年は除外した）。福島県と茨城県の単価が岩手県と宮城県に比べ10円程度低かったのは，漁場形成が三陸沿岸域に比べて時期的に遅れ，概して不安定であったことによると考えられる。

漁獲努力量

漁獲努力量の指標として水揚隻数を用いた。1984～2001年の各県における年間延水揚隻数と１日当たり水揚隻数の推移及び漁港別内訳を **Fig. 4**及び **Fig. 5**に示す。

岩手県における年間延水揚隻数は，1986年から1992年にかけて増加し，1986年の859隻から1992年の5,807隻と約７倍に達した。その後1993～1995年には3,831～4,290隻に減少し，1996～1998年には5,333～6,177隻と増加したが，1998年以降再び減少傾向を示した。宮城県の抄網船は，1987年の9,006隻を最高に減少に転じ，船曳網漁法が導入されて抄網船からの転換が盛んに行われた1991年と1992年を経て，1993年以降概ね1,000隻未満の低水準で推移した。一方，宮城県の船曳網船は，1991年の導入以降3,019～6,060隻の範囲で変動し，その宮城県合計に占める割合は，1991年61%，1992年69%，1993年以降は77～100%を示した。福島県では1985年の4,202隻を最高に減少し，1990年以降はほぼ2,000隻未満で推移した。茨城県では1985年の11,119隻を最高に減少し，1991年以降は概ね2,000隻未満で推移した。

岩手県における１日当たり水揚隻数は1987年から

2000年にかけて増加し，1984～1987年の34～41隻/日から2000年には121隻/日と約3倍に達した。宮城県の抄網船は，1988年に139隻/日のピークに達した後減少した。1993年以降における宮城県合計の隻数の大半は，船曳網船で占められているが，102～133隻/日の範囲で概ね横這いに推移した。福島県では，1985年の64隻/日をピークに以降概ね50隻/日未満で推移した。茨城県では，1985年の164隻/日をピークに減少し，1991年以降50隻/日未満で推移した。

各県の年間延水揚隻数の漁港別内訳をみると，岩手県では1984～1987年には県南の大船渡と細浦が85.0～93.1%を占めたが，1988年から山田の占める割合が増加するとともに細浦の占める割合が減少した。また，1996年から宮古，1997年から釜石の占める割合が増加し，1984～1995年に平均48.7%を占めていた大船渡は，1996～2001年には平均31.8%にまで減少した。宮城県では1984～1987年には渡波と石巻の占める割合が合計33.3～44.2%を占めたが，1988年から減少し，渡波では1989年以降水揚げがなくなった。また，石巻の占める割合も1988年以降20%未満で推移し，特に親潮第一分枝北偏型の年では低い傾向がみられた。一方，1987年頃から県北の気仙沼の占める割合が増加し，1989年以降23.5～46.0%の範囲で推移した。女川の占める割合は，1984～2001年の間38.4～54.8%の範囲でほぼ安定して推移した。福島県では概して県南の小名浜と勿来の占める割合が高かったが，両港の占める割合は，水揚げが殆どなかった1995年を除き，35.2～91.5%の範囲で大きく変動した。茨城県では，1984～1989年には，大洗以南の占める割合は，22.6～42.5%であったが，1990年以降減少し，1993，1996，2000年に20%を越えたものの，その他の年では5%未満であった。一方，1990年以降県北の平潟と大津の占める割合が急増し，両港合わせて65.7～100%を示した。

漁獲量

1971年以降における総漁獲量は，経年変動が顕著で，1992年までは概して増加傾向にあった（**Fig. 6**）。すなわち，1974年には1万トン，1978年には4万トン，1984年には5万トン，1987年には8万トンを越え，1992年には史上最高の10.8万トンに達した。しかし，1993年から岩手県と宮城県，1994年からは岩手県，宮城県，福島県及び茨城県において総量規制が実施され，1993年以降6万トン前後で大きな変動がなく推移している。

県別にみると，1970年代には宮城県の漁獲量が，1977年を除き，総漁獲量の概ね70%以上を占めたが，1981年から1986年にかけて茨城県の漁獲量が顕著に増加し，この間の総漁獲量を顕著に増加させた。1987年以降茨城県の漁獲量は減少したが，その一方で1987年から1990年にかけて岩手県の漁獲量が急激に増加し，1990年以降は岩手県と宮城県の合計が総漁獲量の79.0～100%を占めた。なお，1995年と1997年には茨城県において，1999年には福島県と茨城県において全く漁獲がなかった。

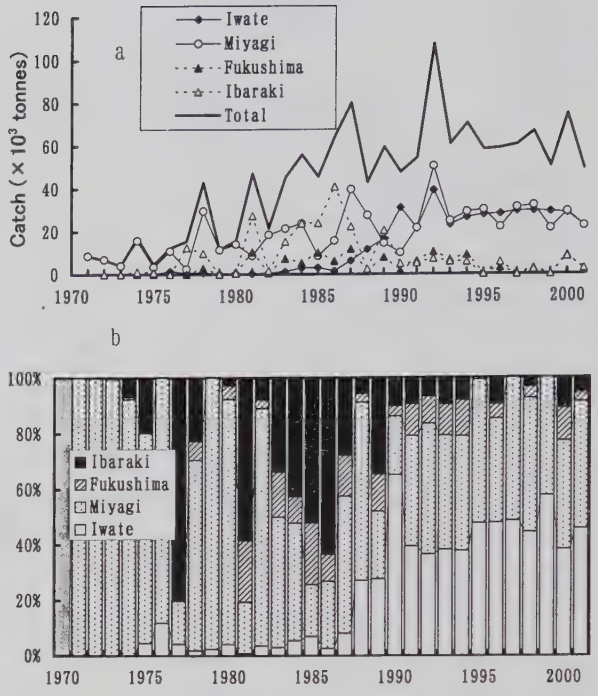


Fig. 6. Annual variations in the catch (a) and the percentage composition from each prefecture (b) from 1971 to 2001.

一方，総量規制の採用された1993年以降の漁獲量をみると，岩手県及び宮城県の船曳網船では，後者の1996年と1999年を除いて，各年とも約3万トンの規制量にほぼ相当する漁獲量となっている。宮城県の船曳網船において1996年に規制量を大幅に割り込んだのは，漁獲量が規制量に達しないまま予め設定された操業期限を迎えたことにより，また，1999年については，暖水の波及による漁場の自然消滅によるものであった。一方，福島県及び茨城県では，1994年の福島県及び2000年の両県を除き，各年とも規制量を大幅に下回った。

1971年以降の親潮第一分枝最南下緯度と総漁獲量，宮城県の抄網船及び常磐沿岸域の漁獲量の経年変動を**Fig. 7**に示す。総漁獲量が前後の年に比べて飛躍的に伸びた1974，1978，1981，1984，1987，1992年は，1987年が親潮第一分枝中位型であった以外全て南偏型であった。一方，総漁獲量が前後の年に比べて落ち込んだ1975－1977，1979－1980，1982，1985，1988－1991年は，1977，1982，1989年が南偏型であった以外，中位型もしくは北偏型であった。常磐沿岸域の漁獲量との関係を

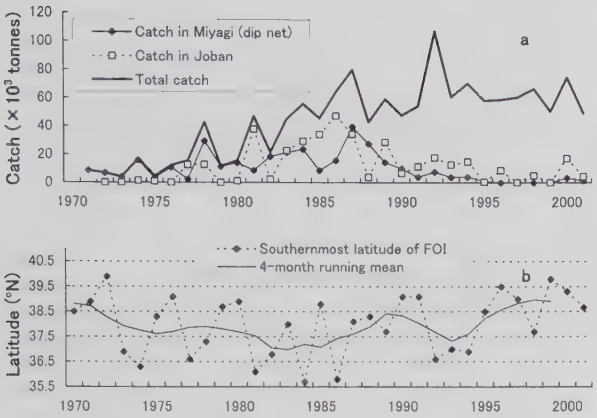


Fig. 7. The annual catch in Miyagi (dip net), Joban and total (a) and the southernmost latitude of the first branch of the Oyashio Current (FOI ; b).

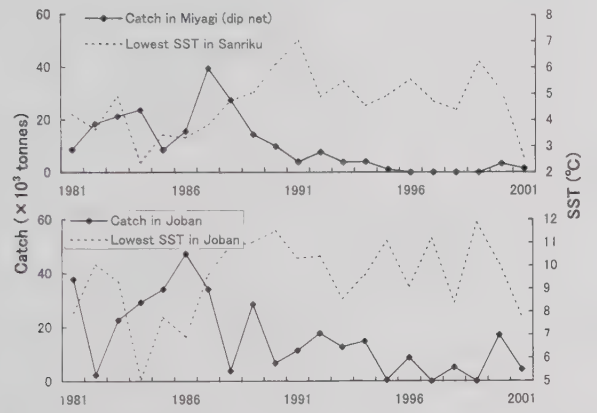


Fig. 8. Relationship between the lowest SST in the Sanriku and Joban coastal waters and the annual catch in Miyagi (dip net) and in Joban.

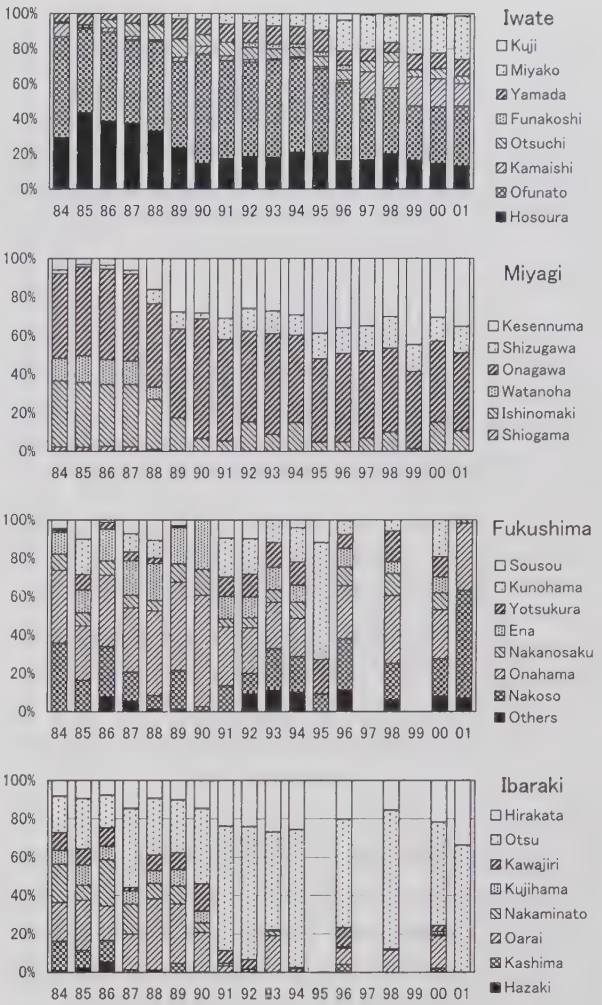


Fig. 9. Percentage composition in the catch from each port in each prefecture.

みると，飛躍的に漁獲量が伸びた1977, 1981, 1984～1986年は，1985年を除いて，南偏型であった。一方，宮城県の抄網船との関係については，飛躍的に漁獲量が伸びた1974, 1978, 1987年のうち1974年と1978年は南偏型で，1987年は中位型であったが，1977年と1981年のように南偏型の年に漁獲量が落ち込む場合もみられた。

1981年以降の三陸・常磐沿岸域における表面水温の年間最低値と宮城県抄網船及び常磐沿岸域の漁獲量の関係を **Fig. 8**に示す。宮城県抄網船について，船曳網船への転換が盛んであった1991－1992年以前をみると，年間最低値が6℃を越えた1990年に顕著に漁獲量が落ち込んだ以外，年間最低値との間で特徴的な関係はなく，1993年以降も特徴的な関係はみられなかった。一方，常磐沿岸域では，漁獲努力水準の移行期である1990年以前をみると，高水温期に漁獲量が伸びた1989年を除けば，概ね漁獲量と年間最低値との間に逆相関の関係がみられた。また，1991年以降では，年間最低値が11℃を越えた年には殆ど漁獲がなかった。

1984年以降の各県における漁港別漁獲量（**Fig. 9**）は，各県とも前述した年間延水揚隻数の漁港別内訳（**Fig. 5**）と同様な傾向を示した。すなわち，岩手県では，大船渡の割合が1995年以前の平均52.7%から，1996年以降には，宮古と釜石の割合が増加したため，平均35.6%にまで減少した。宮城県では，1988年以降気仙沼と志津川の割合が増加するに伴って石巻の割合が減少し，とりわけ親潮第一分枝北偏型の年に顕著に低くなる傾向を示した。一方，女川の割合には，大きな変化はなく，40.2～62.1%の範囲で推移した。福島県では，1995年を除き，小名浜と勿来の割合が高い傾向にあった。茨城県では，1990年以降大洗以南の割合が減少する一方で，平潟と大津の占める割合が急増し，1991年以降両港は75.7～100%を占めた。

以上の結果から，最近十数年間をみると，三陸沿岸域では大船渡と女川，常磐沿岸域では大津が水揚港として重要な役割を果たしてきたと考えられる。そこで，

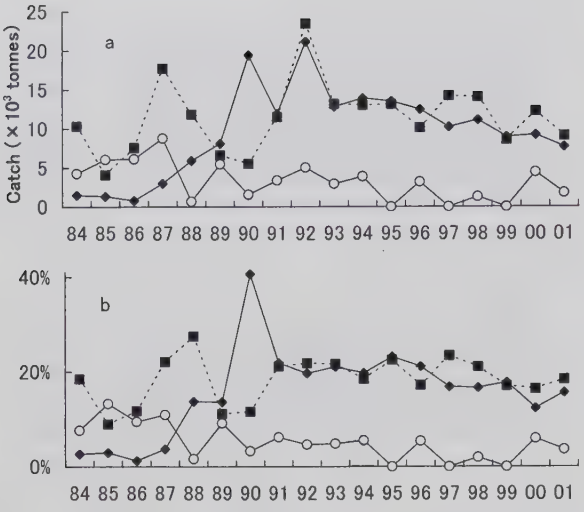


Fig. 10. Annual variations in the catch from the three principal ports (a) and the percentage of the total catch for each of the three principal ports (b). Solid diamonds : Ofunato ; solid squares : Onagawa ; open circles : Otsu.

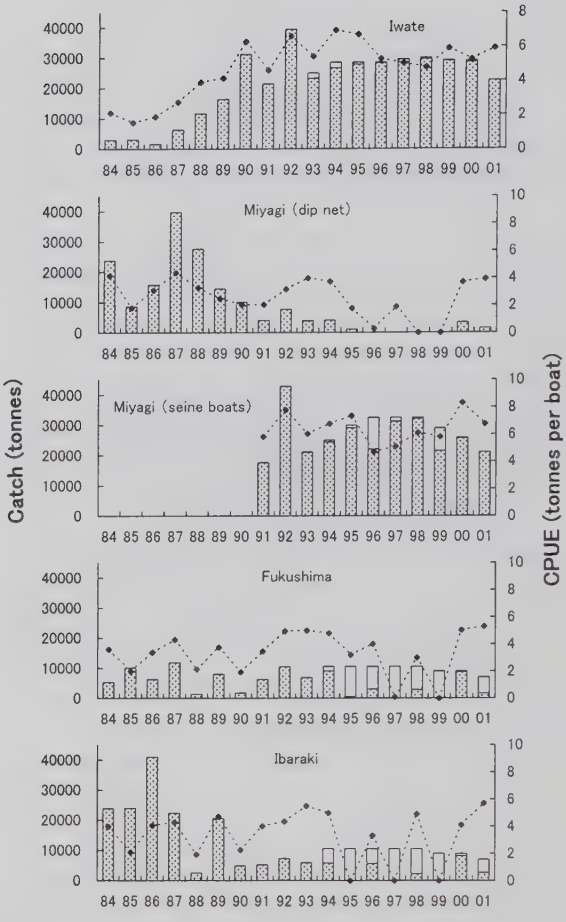


Fig. 11. Annual variations in the catch (dotted bars) and CPUE (line). Open areas show the residual of the total regulated catch removing the actual catch. The regulated value shown for seine boats in Miyagi Prefecture from 1994 to 2001 is calculated as the total regulated value over the prefecture removing the actual catch of the dip net fishing.

これら主要3港における水揚量の総漁獲量に占める割合（**Fig. 10**）をみると，大船渡では1987年から1990年に急激に水揚量が増加すると同時に総漁獲量に占める割合も激増し，1987年までの4％未満から1990年には40.7%に達した。1991年以降は平均18.7%で推移していたが，1997年から若干下降傾向を示している。女川では，1991年までは水揚量の増減に応じて総漁獲量に占める割合も増減したが，1991年以降は平均19.9%と大船渡とほぼ同じ割合で安定して推移している。大津では，1984～1987年には7.7～13.3%であったが，1988年以降減少し，1991年以降平均3.5%で推移している。

年間平均 CPUE

1984～2001年の各県における年間平均 CPUE を漁獲量とともに **Fig. 11**に示した。岩手県の年間 CPUE は，1986～1990年に著しく増加し，1986年の1.9トンから1990年の6.3トンに達した。1991～1995年には4.6～7.0トンの間を不規則に変動したが，1996年以降4.8～5.9トンとピーク時より低い水準に横這いで推移した。宮城県の抄網船では，1987，1993，1994，2000，2001年は約4トンと高く，1990，1991，1995，1997年には約2トンと低く，1996，1998，1999年には殆どあるいは完全に0トンであった。宮城県の船曳網船では，1992年と2000年はそれぞれ7.8トン及び8.3トンと高かったが，1996～1999年には低く，特に1996年と1997年はそれぞれ4.7トン及び5.1トンと最低水準であった。1991～2001年における船曳網船の年間平均 CPUE の平均は，6.4トンであったのに対し，抄網船では同期間漁獲のなかった1998年と1999年を除いて，2.7トンであった。この結果，船曳網船の漁獲効率は抄網船に比べ2倍以上であると推察される。福島県と茨城県とはほぼ同様な年間平均CPUEの経年変動を示し，1987，1992～1994，2000，2001年は両県とも4トン以上と高かった。一方，1988年と1990年は両県とも約2トンと低く，1995，1997，1999年は1995年の福島県以外は両県とも殆ど0トンであった。また，1995年の福島県における CPUE は，3.2トンとそれほど低くはなかったが，全操業日数は8日間と極めて短期間であり，同年の来遊資源量は少なかったと考えられる。

岩手県及び宮城県では1993年以降，常磐沿岸域（福島県及び茨城県）では1994年以降に漁獲上限枠が設定されている。**Fig. 11**には，各県の漁獲量とともに漁獲上限枠を示しているが，岩手県では1993年以降ほぼ毎年漁獲規制枠一杯の漁獲が行われてきたのに対し，常磐沿岸域では，漁獲量が漁獲制限枠を下回ることが

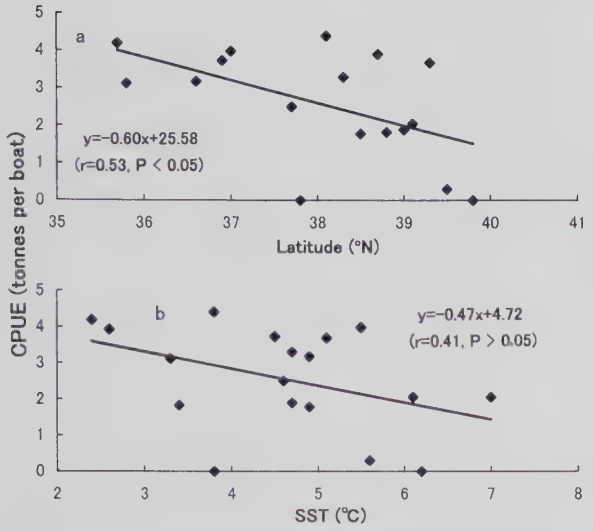


Fig. 12. Relationship between the annual CPUE by dip net fishing of Miyagi Prefecture and the southernmost latitude of FOI (a) and between the CPUE and the lowest SST along the Sanriku coastal waters (b).

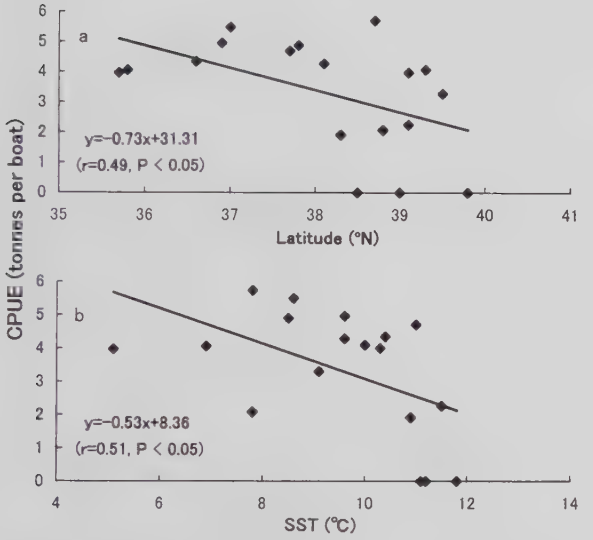


Fig. 13. Relationship between the annual CPUE of Ibaraki Prefecture and the southernmost latitude of FOI (a) and between the CPUE and the lowest SST along the Joban waters (b).

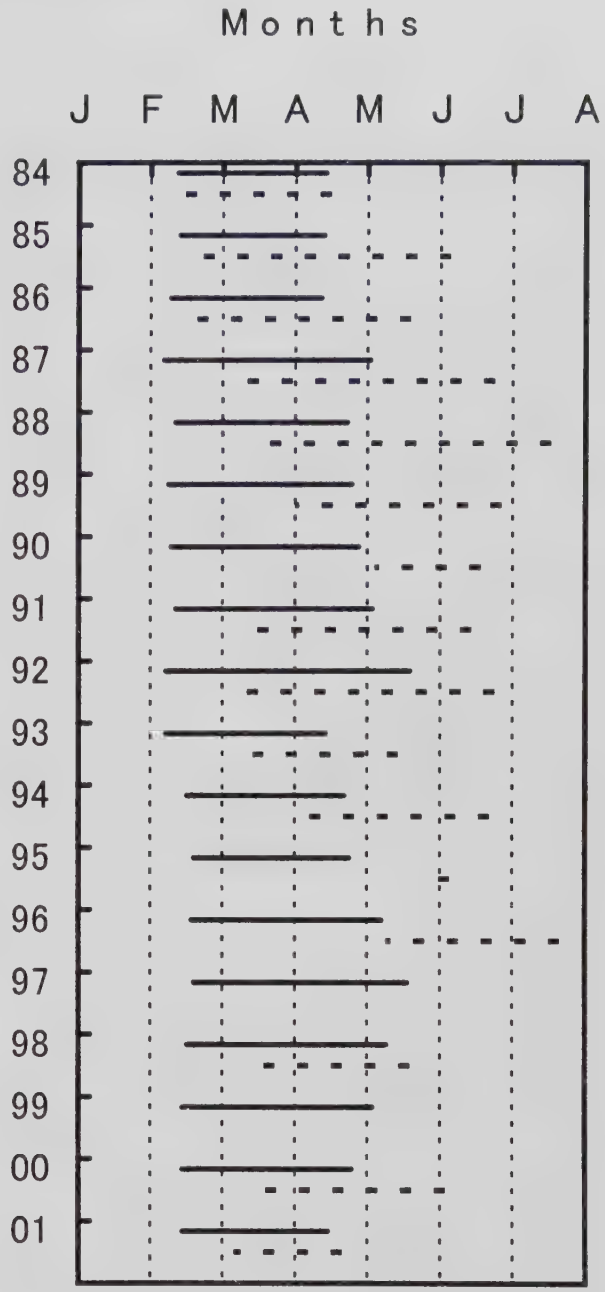


Fig. 14. Fishing period in Sanriku (solid lines) and Joban (broken lines) waters from 1984 to 2001. The first fishing day is defined as the first day when the catch was larger than 5 tonnes and the following fishing was conducted within the following 3 days. The last fishing is defined as the last day when the catch was larger than 5 tonnes and the preceding fishing had been conducted within the preceding 3 days.

多かった。また,1994年以降の宮城県では，漁獲上限枠が船曳網船と抄網船の漁獲量の合計値として設定され（**Table 3**），漁獲量の大半は船曳網船によって占められた。従って，宮城県の抄網船及び常磐沿岸域のCPUEは，生産調整に大きくは影響されていなかったと推測される。実際，宮城県の抄網船及び常磐沿岸域におけるCPUEには顕著な経年変動が現れており，漁獲規制の下においても，自然環境の変化がCPUEに大きな影響を与えていたものと考えられる。そこで，これらの年間平均CPUEと最南下緯度並びに三陸・常磐沿岸域の表面水温の年間最低値との関係を調べた。1984～2001年の宮城県の抄網船については，最南下緯度とは相関係数0.53（$P<0.05$）の有意な負の相関が得られたが，三陸沿岸域の表面水温の年間最低値とは相関係数0.41で5％危険率において有意な相関は得られなかった(**Fig. 12**)。また，1984～2001年の茨城

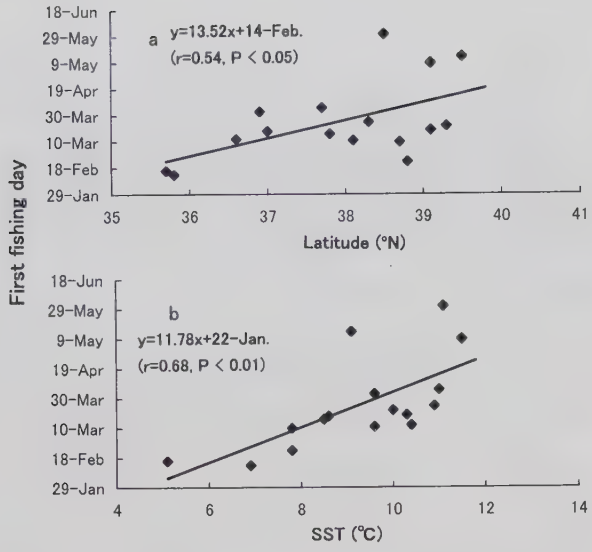


Fig. 15. Relationship between the first fishing days along the Joban coastal waters and the southernmost latitude of FOI (a) and between the first day and the lowest SST along the Joban coastal waters (b).

県については,最南下緯度とは相関係数0.49(P<0.05),常磐沿岸域の表面水温の年間最低値とは相関係数0.51(P<0.05)と有意な負の相関が得られた(**Fig. 13**)。

漁　期

1984～2001年の三陸沿岸域(岩手県と宮城県)と常磐沿岸域(福島県と茨城県)における漁期の経年変化を**Fig. 14**に示す。三陸沿岸域では初漁日は概ね2月上・中旬の範囲にあった。なお,1993年からは操業開始日が規制されているため(**Table 3**),これらの年の初漁日は必ずしも自然的要因によるものではない。一方,常磐沿岸域では漁期の経年変動が顕著であった。親潮第一分枝南偏型の1984年と1986年,及び北偏型であったが漁期中の低温傾向が顕著であった1985年には三陸沿岸域と同様2月上・中旬に初漁日があった。高温傾向もしくは北偏型であった1990,1995,1996年には5月上旬以降と顕著に遅れる傾向にあった。それ以外の年は,概ね3月中に初漁日があった。

漁場が殆どあるいは全く形成されなかった1997年と1999年を除いた1984～2001年の常磐沿岸域の初漁日と親潮第一分枝最南下緯度及び表面水温の年間最低値との関係を調べた。その結果,親潮第一分枝最南下緯度との間には,相関係数0.54(P<0.05)の有意な正の相関関係が得られた(**Fig. 15**)。一方,表面水温の年間最低値との間には,相関係数0.68(P<0.01)と最南下緯度以上に強い相関が得られた。また,1984～2001年の常磐沿岸域における初漁日と茨城県の年間平均CPUEとの間には,相関係数0.56(P<0.05)の有意な負の相関が得られた(**Fig. 16**)。

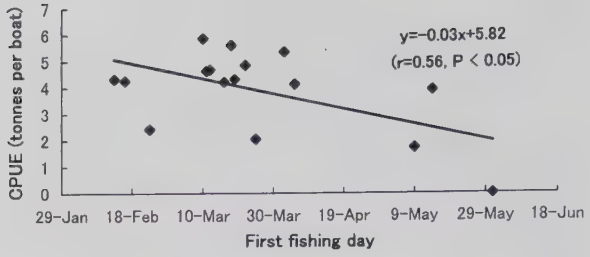


Fig. 16. Relationship between the first fishing day along the Joban coastal waters and the annual CPUE of Ibaraki Prefecture.

終漁をもたらす要因は,海域及び年によって様々で,黒潮系暖水の波及等による漁場の自然要因による消滅ばかりでない。例えば,1984年の全域及び1986年の常磐沿岸域では,単価暴落によるメロードやコウナゴ(イカナゴの稚幼魚)等他魚種漁業への転換によって終漁している。常磐沿岸域においては,その他の年についても,兼業のシラス(カタクチイワシ),カタクチイワシ,メロード,コウナゴ等の漁場形成状況や単価の動向との兼ね合いが終漁の一因になっていると考えられる。一方,岩手県では,1993年以降ほぼ毎年漁獲規制枠に達した段階で終漁しているため,当海域で海況と終漁との関連を見いだすのは難しい。また,1985年以降底付群を漁獲対象としている常磐沿岸域と表中層群を漁獲対象としている三陸沿岸域とでは単純に終漁時に関わる環境要因を比較することはできない。

主漁期における漁況の推移

1984～2001年における三陸・常磐沿岸域の主要港である岩手県大船渡,宮城県女川及び茨城県大津の漁況の推移を**Fig. 17**に示す。

大船渡では1984～1986年の主漁期における日水揚量及びCPUEは,それぞれ50～100トン及び2～3トン程度に過ぎなかったが,1986年から1990年にかけて顕著に増加し,1990年の主漁期にはそれぞれ300～500トン及び8～11トン程度に達し,以降2001年まで主漁期のCPUEは6トン以上の高水準を保った。主漁期の開始は,概ね2月下旬もしくは3月上旬にあったが,1996年は3月下旬と遅れた。

女川では前述のように1984～1990年は抄網船のみの漁獲であったのに対し,1991年以降は抄網船と船曳網船の漁獲が混交している。1992年以降は,その内訳の詳細は把握されていないが,船曳網船の漁獲によって大半が占められていたと推察される(**Fig. 12**)。1984～1990年における抄網船の主漁期の漁況をみると,1984年と1987年は日水揚量及びCPUEとも高く,CPUE

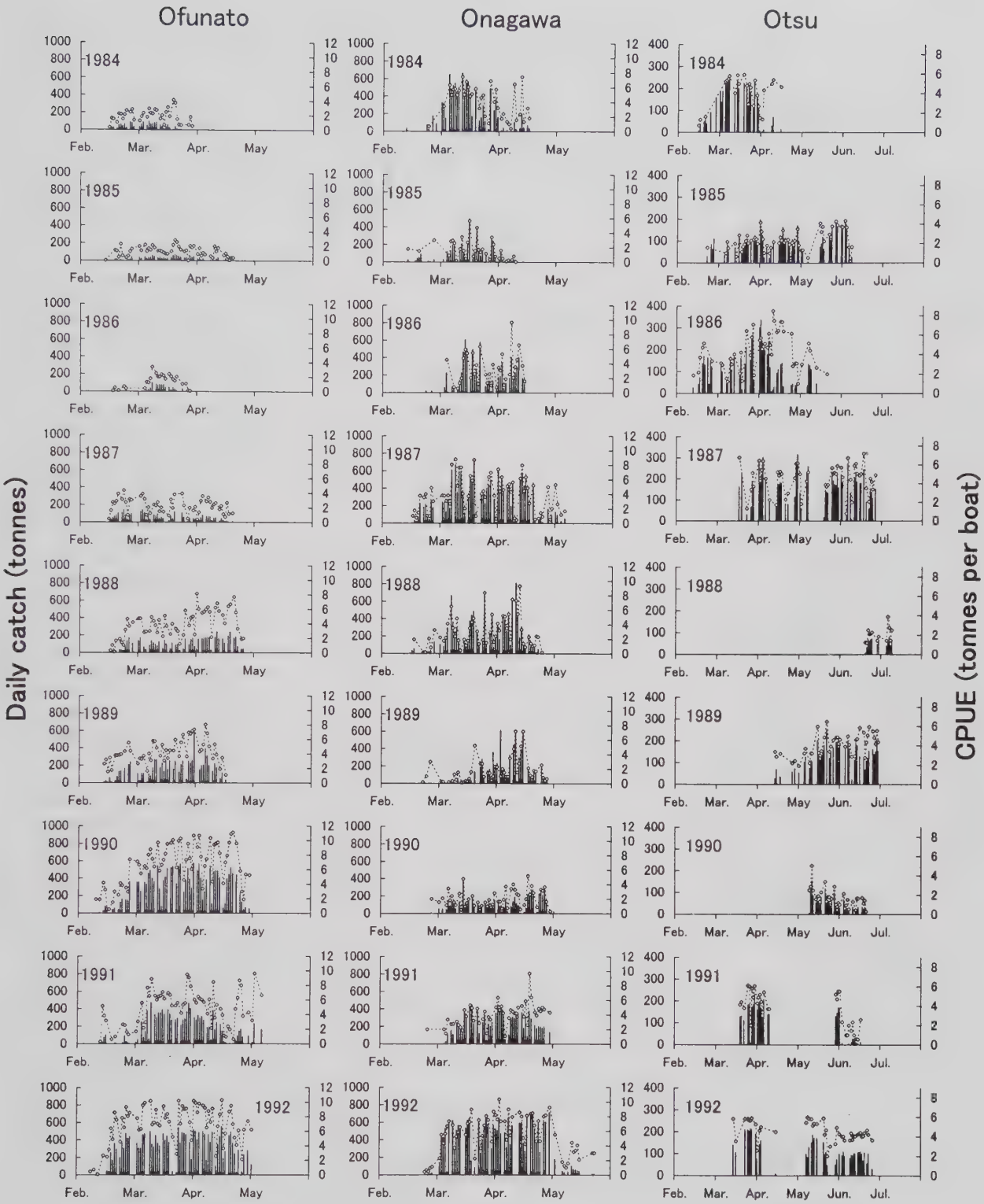


Fig. 17. Daily catch (bars) and CPUE (line) at the three principal ports ; Ofunato (Iwate Pref.), Onagawa (Miyagi Pref.) and Otsu (Ibraki Pref.).

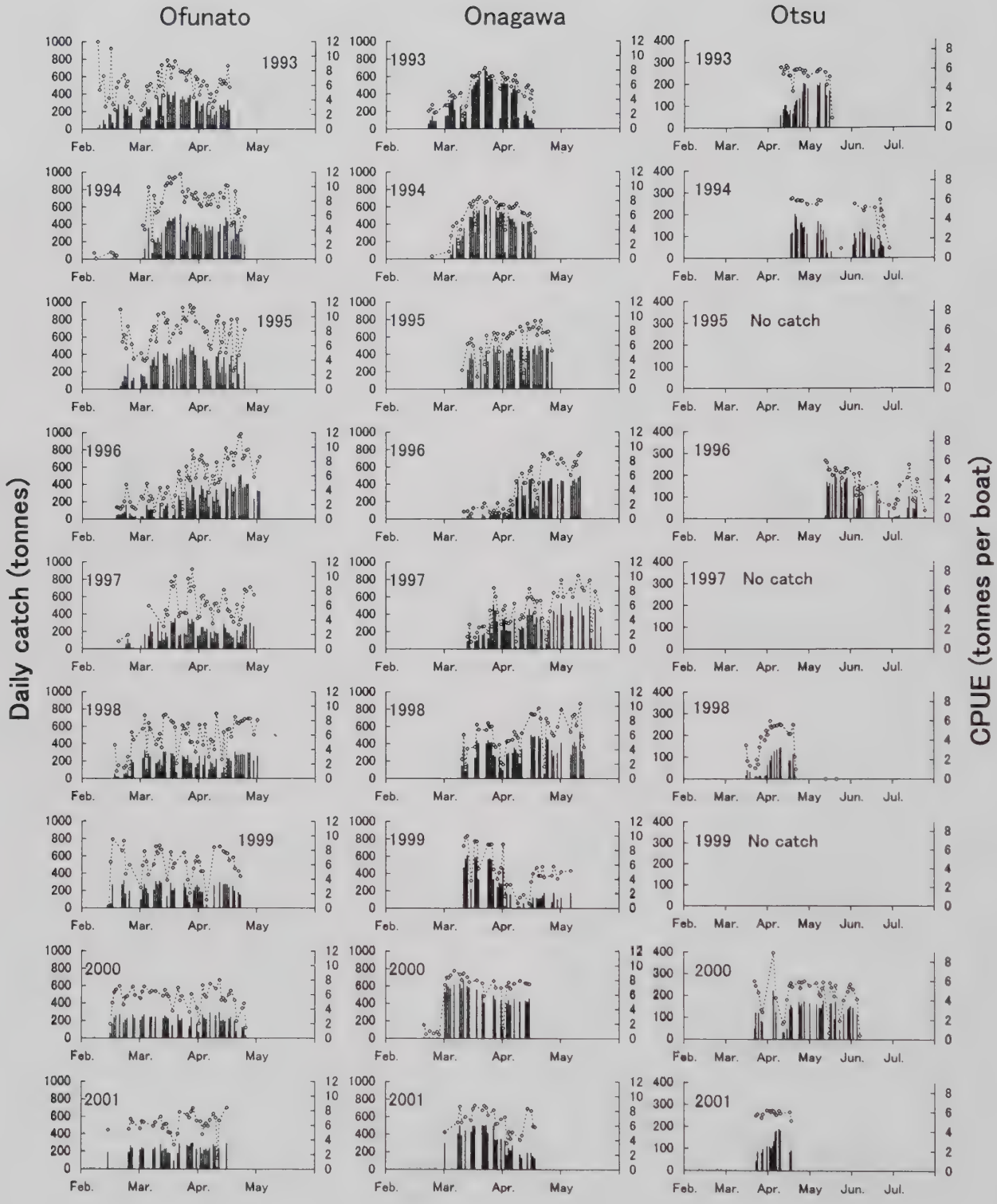


Fig. 17. Continued.

5トン以上の日が多く，1986年と1988年はCPUE 3～5トンと中程度であり，一方，1985, 1989, 1990年は，3トン未満のCPUEの日が多かった。1984～1990年の主漁期は概して3月上旬～4月中・下旬にあったが，1989年には4月上・中旬とその開始時期が遅れた。1991年の抄網船の主漁期は，3月上旬～4月上旬で3トン未満のCPUEの日が約80%を占めた（瀧ら，1993）。1992年以降主漁期はCPUE 7トン以上で推移し，浮上集群を漁獲対象としている抄網船より表中層群を対象としている船曳網船の方が漁獲効率の高いことを反映した。1993年以降操業開始日の規制が設けられたため，主漁期の開始時期をそれ以前の年と単純に比較することはできないが，1996年と1997年は，3月中旬の漁期開始直後には日水揚量及びCPUEとも低水準で推移し，4月中旬～5月上・中旬に主漁期を迎えており，明らかに他の年に比べて資源の来遊時期が遅れていたと判断できる。

大津では，大船渡と女川に比べて漁況の経年変動が顕著であった。1984, 1986, 1987, 1989, 2000年の主漁期のCPUEは5－6トンと高かったが，1988年と1990年は漁期が短期間でかつ漁期中のCPUEも3トン未満と低く，1995, 1997, 1999年は水揚げが皆無であった。一方，主漁期の変動も顕著で，その開始時期は，1984～1986年には2月下旬もしくは3月上旬と女川と殆ど同じであったが，1987, 1991, 1992, 2000, 2001年は3月中・下旬，1993年と1994年は4月中・下旬，1988～1990, 1996年は5月以降であった。なお，大津におけるCPUEの最高水準は，約7トンと大船渡及び女川の約9トンに比較して低いが，これは三陸沿岸域における漁船の大きさが10～20トン（抄網船は10トン前後）であるのに対し，常磐沿岸域では5トン程度と，漁獲物積載能力に差があること及び1989年以降，1日1隻当たりの漁獲量制限（6トン以下）が行われたことに起因すると考えられる。

1992～2001年における県別旬水揚量並びに旬別CPUEの推移（**Fig. 18**）をみると，岩手県では，主漁期は概ね3月上旬～4月中旬にあったが，1996年は3月下旬～4月下旬と遅れた。宮城県の抄網船では，1992, 1993, 2000年は2月下旬もしくは3月上旬に漁が始まったが，1995～1997年は旬水揚量及びCPUEともきわめて低水準に推移し，漁の開始は3月下旬以降に遅れた。宮城県の船曳網船では概して3月中旬～4月中旬に主漁期があったが，1996年と1997年は，3月中・下旬までの旬水揚量及びCPUEが低く，4月中旬～5月中旬に主漁期があった。一方，1999年は3月中・下旬が主漁期で，4月以降旬水揚量及びCPUEとも低下した。福島県と茨城県の漁況経過の経年的特徴はよく似ており，1992, 1993, 1998, 2000, 2001年は主漁期が3月下旬～5月中旬にあったが，1996年は漁期が5～6月と遅れた。また，1995, 1997, 1999年は，両県とも殆どもしくは全く水揚げがなかった。以上のように1992～2001年における岩手県，宮城県及び常磐沿岸域の漁況の推移は，各々の主要港と同様な傾向を示した。

考　　察

漁業の変遷

ツノナシオキアミ漁業の歴史は，大きく4期に分けることができる。

第1期は，漁業が始まった1940年代中盤から1960年代後半までの創成期である。この時期は，漁場は宮城県牡鹿半島周辺に限られ，地元を中心とした食用や餌料としての需要を賄うための零細漁業の一つに過ぎなかった。

第2期は，1960年代後半から1987年頃までの発展期である。この時期は，養殖漁業の振興や遊魚の普及によって需要が拡大し，漁獲物鮮度保持方法の改善や漁労技術の発達とともに宮城県と茨城県を中心として漁獲努力量が増大した結果，総漁獲量が飛躍的に伸びた時期に相当する。また，この時期は，親潮第一分枝が南進傾向を示し，南北に広く好漁場が形成された年が多く，このことが当時期の漁獲量増大に拍車をかけた。

第3期は，1988年頃から1992年頃までの主漁場移動期である。この時期には岩手県における船曳網漁法の定着や魚群探知機導入による漁獲効率の向上と漁獲努力量の増大及び宮城県における船曳網漁法の導入があり，三陸沿岸域における漁獲能力の水準が飛躍的に伸びた。一方，常磐沿岸域では，親潮第一分枝が第2期に比べて北偏傾向であったため，南部を中心に漁獲量が減少し，漁獲努力水準が低下した。その結果，三陸沿岸域が当漁業の中心となり，単価の相場形成もほぼ完全に岩手・宮城両県での需要と水揚げで決定されるようになった。

また，同時期は，仙台湾に面する石巻と渡波の宮城県内における水揚港としての地位が低下した時期でもある。この原因の一つとして，親潮第一分枝の北偏傾向に伴ってツノナシオキアミの主生息域と考えられる親潮系冷水が仙台湾にまで流入する機会が減少し，仙台湾に好漁場が形成されにくくなったことが考えられる。実際，石巻では1989年以降，親潮第一分枝南偏型の年もしくは三陸沿岸域の表面水温が低温傾向の年に漁獲量及び宮城県における漁獲割合が高くなり，北偏型の年にそれらが低くなる傾向を示している。

第4期は，1993年頃から現在に至る生産調整期である。この時期には，常磐沿岸域では第3期に引き続き，ツノナシオキアミの漁況が低水準に推移するなかで，

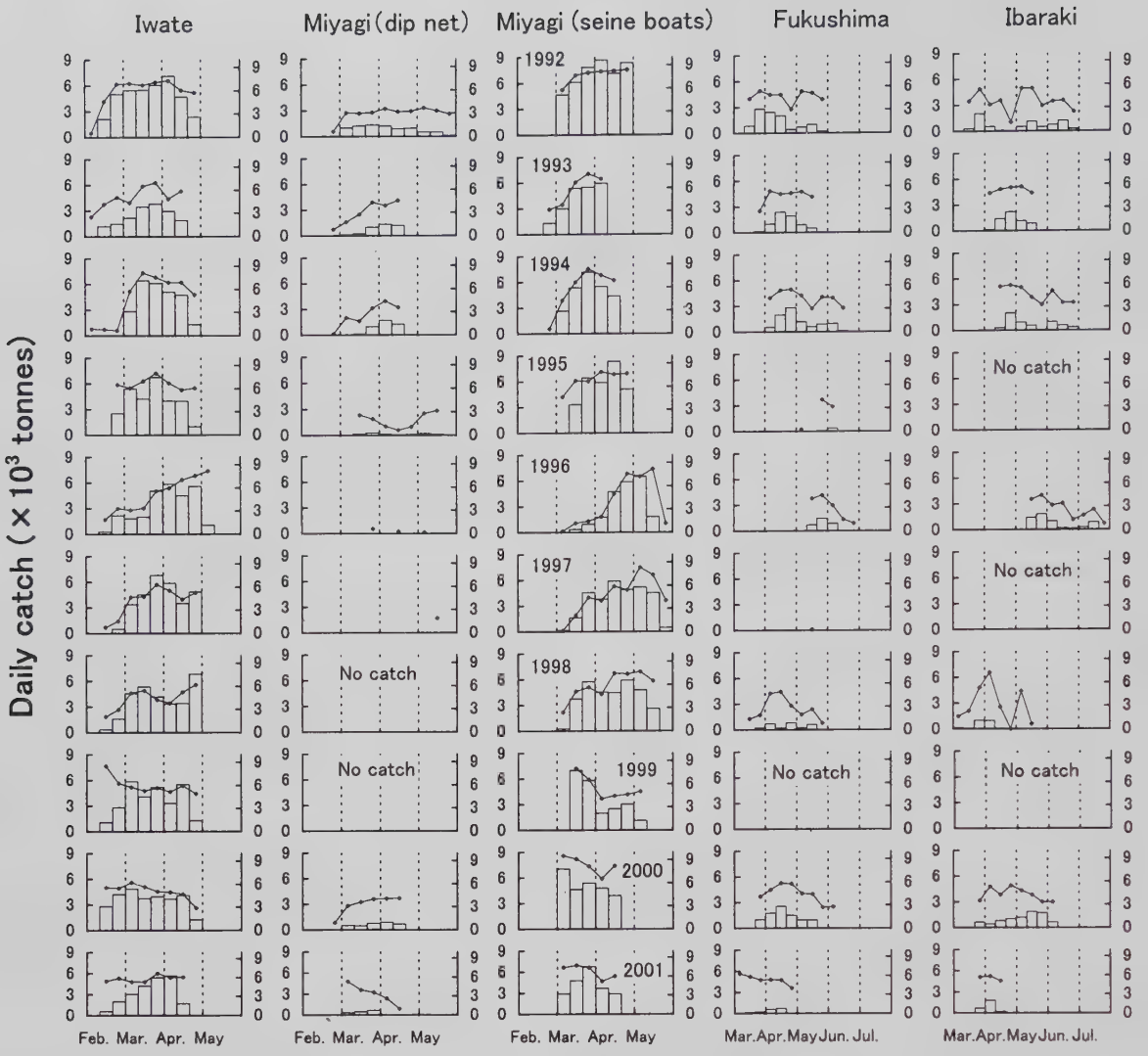


Fig. 18. Variations of the ten days catch (bars) and CPUE (line) in each prefecture.

海況変動に応じた漁業経営戦略が発展し，一方，第3期にツノナシオキアミ漁業の中心となった三陸沿岸域では，需給バランスの見通しが明らかになるなかで，生産調整が効率的に図られた。

常磐沿岸域では，2－3月からのメロード及びコウナゴ漁場の形成に引き続き，5－6月からシラス及びカタクチイワシの漁場が形成される。そのため，ツノナシオキアミの漁況が低調な場合には，比較的容易にこれらの漁業に切り替えることができる。特にシラスやカタクチイワシ漁業はツノナシオキアミと対照的に黒潮系暖水波及に伴って漁場が形成されるため（海老沢，1996），親潮系冷水の南下が弱くツノナシオキアミの好漁場が形成されない時には，ツノナシオキアミ漁業に比べて単価が高く，船上労力が少なくて済むシラス漁業等が優先的に行われている。このような経営戦略に加え，第3期において漁獲努力水準が低下したこともあって，暖水波及が特に顕著であった1995，1997，1999年には当海域においてはツノナシオキアミの操業は全く行われなかった。

一方，岩手県ではイカ釣りやカジキ突棒漁を兼業としているが，ツノナシオキアミ漁場が形成される2～4月にはこれらの漁業はなく，この間はツノナシオキアミの操業に専念するためツノナシオキアミ漁業への依存度が高い。また，宮城県の船曳網船の約半分はコウナゴを対象とした火光利用敷網漁業の許可も得ているが，通常ツノナシオキアミ漁業が終漁してからコウナゴの操業を始めており，岩手県同様ツノナシオキアミの漁場形成時期には概してこれを主対象とした操業に専念している。このように，岩手県並びに宮城県は，ツノナシオキアミ漁業の主導権を握るなか，需給動向に応じて毎年の漁獲上限枠を両県合わせて約6万トンに設定するとともに，1日1隻当たり漁獲量や漁期等を制限することにより平均単価の維持を図り，40円以上の水準を保ってきた。

しかし,2000年には，養殖漁業者の需要減に伴い在庫が大量に発生し（湊，私信），翌2001年には，総量規制枠を前年より１万７千トン落としたにも関わらず，単価は,29円と大幅に落ち込んだ。養殖漁業の衰退に伴って，これまで以上に需要は減少しつつあり，今後，再度需給バランスを下方に修正する必要が生じている。

各海域における来遊状況と海況との関係

前述の通り，ツノナシオキアミ漁業では様々な仕方で生産調整が行われており，漁業データから資源の動向を推測する際には注意を要する。以下では，各海域における漁業の実態をふまえ，資源の来遊状況と海況との関係を検討する。

岩手県における漁獲量(**Fig. 6**)及びCPUE(**Fig. 11**)は,1987年頃から急激に増加した。しかし,1980年代後半は，漁獲努力量の増加とともに抄網船から船曳網船への転換並びに魚群探知機の普及が積極的に進められ(湊，私信)，漁獲効率も同時に向上した時期でもあり，当時の漁獲量と CPUE の急増が来遊資源量の増加と関係しているかどうか判断することはできない。また，1996年以降，年間平均 CPUE がピークの1990～1995年より低い水準で推移したが，これは1996年に宮古,1997年に釜石の水揚船が増加した結果，県内全体の水揚隻数が増えたため，価格維持を目的に１日１隻当たり漁獲量をそれまでの年より低く抑えたことによると考えられる。このように，岩手県では，来遊資源量の経年的動向を CPUE から推測することは難しい。しかし，宮城県以南において海況変動の影響が原因と考えられる CPUE の低下や主漁期の遅れが顕著に現れた年でも，岩手県では,1996年に主漁期の開始が遅れたこと以外，海況変動によるとみられる CPUE の低下等はなく，岩手県沿岸域における資源の来遊状況は，南の３県に比べて海況変動に左右されにくく，比較的安定していると考えられる。なお，1996年に主漁期の開始が遅れた原因は，同年の親潮第一分枝の北偏に伴って来遊時期が遅れたことであると推察される。

1984年以降における宮城県抄網船の年間平均 CPUE は，親潮第一分枝最南下緯度との間に有意な負の相関があった（**Fig. 12**)。一方，1971年以降の漁獲量は，親潮第一分枝が南偏傾向の年に伸びるとは限らず，逆に1977年や1981年のように漁獲量が落ち込む場合がみられた（**Fig. 7**)。小達（1984）は，この両年の現象について，両年とも常磐沿岸域では漁獲量が飛躍的に伸びていたことから，親潮第一分枝の強勢な南下に伴ってオキアミ群が常磐沿岸域に偏在したために三陸沿岸域では殆ど漁獲されなかったと推察している。しかし，異常冷水年（奥田，1986）である親潮第一分枝が最も南下した1984年には，常磐沿岸域及び宮城県抄網船双方で，年間平均 CPUE と漁獲量の顕著な伸びを示しており，親潮の著しい南下に伴ってオキアミ群が常磐沿岸域に偏在するとは必ずしも結論できないことを示唆している。この点については今後も引き続き検討していく必要がある。

なお，漁場形成の条件は，資源が沿岸に来遊するだけではなく，漁獲対象となるレベルまで集群することが必要である。特に抄網漁法では表層浮上群のみを漁獲対象としているため，オキアミ群が来遊しても，表層に浮上して集群しなければ漁獲できず,漁場形成は，親潮第一分枝の南下に加えてその他の様々な要因にも支配されている。浮上集群する条件として，水温の鉛直混合（Komaki, 1967；寺崎，1981)，風による沿岸湧昇流の発生（寺崎，1981)，生息に不適と考えられる５℃以下の冷水の下層への差込(児玉，和泉，1994)等物理的要因や生殖行動(Komaki, 1967；遠藤,1981)，イカナゴやタラ類等捕食者による下方からの追い上げ(児玉，和泉，1994)等生物学的要因が指摘されており，漁場形成条件は複雑である。そのため，抄網船における CPUE の変動要因を把握するためには，これらの浮上集群に関わる生物・物理的環境条件も検証する必要がある。

宮城県の船曳網船は，1991年から生産調整が図られ，1993年から総量規制による上限枠が設定されたため，その CPUE から宮城県沿岸域の来遊資源動向を判断することは難しい。しかし，1996～1999年に宮城県全体及び女川において年間平均 CPUE の顕著な低下がみられている。この期間の１日１隻当たりの漁獲制限が前後の年に比べて特に強化されたという事実はなく，自然的要因による主漁期開始の遅れ（1996年と1997年）や主漁期の早期終了（1999年）によって漁期中の平均的な CPUE の低下がもたらされたと考えられる。また，この間は,1998年を除いて親潮第一分枝が北偏傾向の年に相当しており，このことが来遊時期の遅れや資源の早期逸散と関係していた可能性が示唆される。

常磐沿岸域については，漁獲量が飛躍的に伸びた年は，概して親潮第一分枝が南偏傾向であり，漁獲量と表面水温の年間最低値とは逆相関を示した(**Fig. 8**)。また，親潮第一分枝最南下緯度並びに常磐沿岸域における表面水温の年間最低値と年間平均 CPUE との間にも有意な負の相関が得られた（**Fig. 13**)。さらに，最南限緯度並びに常磐沿岸域における表面水温の年間最低値と常磐沿岸域における初漁日との間に有意な正の相関があり（**Fig. 15**)，初漁日と年間平均 CPUE との間には有意な負の相関があった（**Fig. 16**)。このように，常磐沿岸域では来遊資源量及び来遊時期が親

潮第一分枝の南下もしくは表面水温の年間最低値に示される親潮系冷水の波及度合いによって大きく左右されることが明らかになった。常磐沿岸域では,1980年代中頃以降，下層の冷水に生息する底付群を積極的に漁獲対象としてきたが，今回の結果は，底付群を対象とする漁場についても親潮系冷水の波及による来遊が漁場形成の最も重要な条件であることを示した石川（1990）の指摘を支持している。

以上のことから，岩手県沿岸域における資源の来遊状況は，海況変動に左右されにくく，比較的安定しているのに対し，常磐沿岸域では親潮系冷水の波及動向に大きく左右されると考えられる。また，岩手県沿岸域と常磐沿岸域の間に位置する宮城県沿岸域では，親潮系冷水の波及が弱い年において来遊時期の遅れや来遊資源量の減少が顕著になると考えられる。

謝　　辞

本稿の取りまとめに関して，ご助言とご校閲を賜った東京大学海洋研究所教授寺崎　誠博士に厚くお礼を申し上げる。本研究の推進にあたり，真摯なご指導ご鞭撻を賜った東北区水産研究所混合域海洋環境部長奥田邦明博士に深くお礼を申し上げる。本稿を取りまとめる際に有益なご助言を頂いた同部高次生産研究室長杉崎宏哉博士に心から謝意を表す。漁業の沿革と実態について詳細な情報の提供を頂いた岩手県漁船漁業組合の湊　正幸氏並びに宮城県漁業協同組合連合会の関係各位には心よりお礼を申し上げる。漁況経過に関する資料の収集に長年ご協力下さった全国漁業協同組合連合会東北支所の仙石定信氏並びに石川勝巳氏，漁業情報サービスセンター石巻出張所の浅野政宏氏，岩手県水産技術センターの野澤清志専門研究員ほか関係各位，宮城県水産開発研究センターの富川なす美研究員ほか関係各位，福島県水産試験場の早乙女忠弘研究員ほか関係各位，茨城県水産試験場の安藤隆二主任研究員ほか関係各位には厚く感謝する。海況関連の資料を快く提供して下さった漁業情報サービスセンターの藤田　真課長代理並びに東北区水産研究所海洋環境部海洋動態研究室長渡邊朝生博士に深謝する。英文表現についてご教授頂いたNorthwest Fisheries Science Center National Marine Fisheries Service の Richard D. Brodeur 博士に深くお礼を申し上げる。図表の作成に協力頂いた久成聡恵氏並びに遠藤佐和子氏に心より感謝する。

文　　献

海老沢良忠,1996：鹿島灘におけるカタクチイワシシラスの漁況変動．水産海洋研究，**60**，413－415.

遠藤宜成，1981：三陸海域に出現するオキアミ類の生態学的研究―特に生活史と集群性について―．東北大学農学部博士課程論文，166pp.

石川弘毅，1990：茨城県沿岸におけるツノナシオキアミ漁期の海況について．茨城県水試研報，28，161－167.

児玉純一，和泉祐司，1994：ツノナシオキアミの沿岸漁場形成要因並びに底魚資源との関わり．月刊海洋，**26**，229－235.

Komaki Y., 1967：On the surface swarming of euphausiid crestaceans. *Pacif. Sci*., **21**, 433－448.

小谷祐一，1992：オキアミ漁況予測の考え方と手法開発への取り組み．第１回オキアミ資源研究会議報告，100－105.

小達和子,1979：三陸・常磐沿岸水域におけるオキアミ漁業について．東北水研研報，**40**，15－26.

小達和子,1984：オキアミ漁業と資源．日水学会東北支部会報，**34**，38－46.

小達和子，1991：三陸・常磐沿岸のツノナシオキアミとその漁業．水産研究叢書，**40**,100pp．東京，日本水産資源保護協会.

奥田邦明，1986：1984年の異常冷水現象の発生過程について．東北水研研報，**48**，87－96.

瀧　憲司，小谷祐一，黒田一紀，糟谷孝裕，1993：宮城県女川周辺海域におけるツノナシオキアミの漁況と表面水温・塩分の変動．東北水研研報，**55**，29－35.

寺崎　誠，1981：大槌周辺のオキアミ漁業について．東京大学大槌臨海研究センター報告，**7**，25－33.

水研センター研報, 第3号, 27－29, 平成14年
Bull. Fish. Res. Agen., No. 3, 27－29, 2002

短　報

Regeneration of Cd, P, and N on the continental shelf of the East China Sea in summer

Kazuo ABE*

Abstract Regeneration of three biolimiting constituents, cadmium (Cd), phosphate (PO_4), and nitrite plus nitrate (NO_2+NO_3), was examined on the continental shelf area of the East China Sea in the summer of 1999. Vertical profiles of these constituents showed increase of concentrations toward the sea bottom. The regenerated (molar) ratios to the consumed oxygen (O_2) were estimated to be 0.00134×10^{-3} : 0.00684 : 0.0998 : 1 by plotting these constituents against the Apparent Oxygen Utilization (AOU), and these ratios generally agreed with a previous study near the Ryukyu Islands. The apparent increase of Cd, PO_4, and NO_2+NO_3 in the bottom layer from winter to summer was around 0.079nM, 0.41 μM, and 6.1 μM, respectively, and this was attributable to the active supply caused by the decomposition of the organic matter in the bottom layer in this season.

Key word: Regeneration, Cd, P, N, East China Sea

In summer and autumn, the thermocline was well developed in the continental shelf of the East China Sea (Kusakabe et al., 1998) and under this thermocline, the concentrations of nutrients increased due to the decomposition of organic matter (Watanabe et al., 1995). The objective of this study was to examine the regeneration of biolimiting constituents such as cadmium (Cd), phosphate (PO_4), and nitrite plus nitrate (NO_2+NO_3) at the shelf edge of the East China Sea in summer.

Water samplings were carried out vertically at five stations across the shelf edge of the East China Sea (DK line) from 0 to 200m using acid-cleaned 10l Niskin bottles aboard the R V No.3 Kaiyo-Maru of the Nippon Kaiyo Co., LTD., in July 1999 (**Fig. 1**). The water depths at the stations were 836m, 1,024m, 283m, 127m, and 115 m for DK-05, 06, 07, 08, and 09, respectively. The detailed analytical procedure for Cd was described in Abe (2001), and the water samples for Cd at DK08 and DK09 were filtered through a 0.6 μm Nuclepore filter. The analysis of PO_4, NO_2+NO_3 was carried out using a Bran+Luebbe continuous flow analytical system Model Traccs-800, and dissolved oxygen was analyzed on board by Winkler titration.

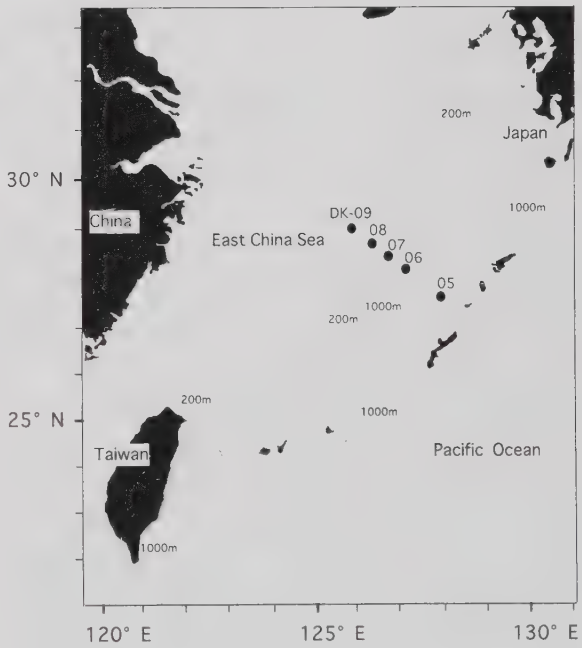


Fig. 1. Sampling sites in this study.

The concentration levels of Cd and nutrients

2002年3月13日受理（Accepted on March 13, 2002）
水産総合研究センター業績 A 第14号（Contribution No.A 14 from Fisheries Research Agency）
* 西海区水産研究所石垣支所　〒907-0451　沖縄県石垣市字浮海大田148-446（Ishigaki Tropical Station, Seikai National Fisheries Research Institute, 148-446 Fukai-Ota, Ishigaki Okinawa 907-0451, Japan）

tended to increase toward the inner shelf station, and maxima of approximately 0.2nM for Cd, 0.8 μM for PO_4 and 11 μM for NO_2+NO_3 were observed near the bottom at DK08. Cd was inserted into the Redfield-type stoichiometric equation, as were the nutrients as follows (Kudo et al., 1996 ; Abe, 2001) :

$$(CH_2O)_{106}(NH_3)_{16}H_3PO_4\mathbf{Cd_a} + 138O_2 = 106CO_2 + 16NO_3 + H_3PO_4 + 122H_2O + \mathbf{aCd}$$

Figure. 2 shows a plot of Cd, PO_4, and NO_2+NO_3 against the AOU at stations DK-08, 09, and 07. The regression lines of the data at DK-07 in each panel were calculated as follows :

$$Cd = 0.0410 + (0.00134 \times 10^{-3}) \times AOU \quad (r = 0.976) \quad (1)$$

$$PO_4 = 0.164 + (0.00684) \times AOU \quad (r = 0.971) \quad (2)$$

$$NO_2 + NO_3 = 2.04 + (0.0998) \times AOU \quad (r = 0.952) \quad (3)$$

Good linearity was obtained at DK-07, and the slopes of these equations denote the regeneration ratios, so the molar ratio of regenerated Cd, PO_4, and NO_2+NO_3 to O_2 was 0.00134×10^{-3} : 0.00684 : 0.0998 : 1. The ratios of the remineralized Cd to P, Cd to N, and N to P were estimated as 0.196 ($nM_{Cd}/\mu M_{phosphate}$), 0.0134 ($nM_{Cd}/\mu M_{nitrite+nitrate}$), and 14.6 ($\mu M_{nitrite+nitrate}/\mu M_{phosphate}$), respectively. The Redfield ratio defines the ratio of the regenerated P and N to the consumed O_2 as 1 : 16 : 138 (Redfield et al., 1963), so the ratio noted above was convertible to 0.185×10^{-3} : 0.944 : 13.8 : 138, and, as regards P and N, a slightly slower remineralization was observed. The ratio of remineralization for P was shown to be about 1 : 150 in the equatorial surface water (Abe, 2001), which agreed with the result of P (1 : 146) in this study. The obtained ratio of Cd to P was very similar to that in a previous report on the remineralization and seawater ratios near the Ryukyu Islands (Abe, 2000 ; Abe, submitted), and the ratio of N/P was similar to the ratio of NO_3/PO_4 in seawater (e.g., Pai and Chen, 1994).

The intercept of the y-axis in **Fig. 2** denotes the preformed fraction, and the preformed Cd, PO_4, and NO_2+NO_3 were 0.041nM, 0.164 μM, and 2.04 μM at DK-07, respectively. A preformed fraction itself indicates an initial concentration when the water mass is exposed to excess oxygen in the surface layer. In this study, at DK-08 and 09, the preformed concentration was assumed to indicate the concentration in winter because the water in winter was well mixed and the calculated AOU values were almost 0 μM from the surface to the bottom at the station near DK-08 and 09 (Iseki, 1993). The slopes calculated using the data at DK-07 were applied to the DK-08 and 09 plots for the area near the bottom, and the other layers in each panel with the assumption that the remineralization rate at DK-07 was equal to that at the other

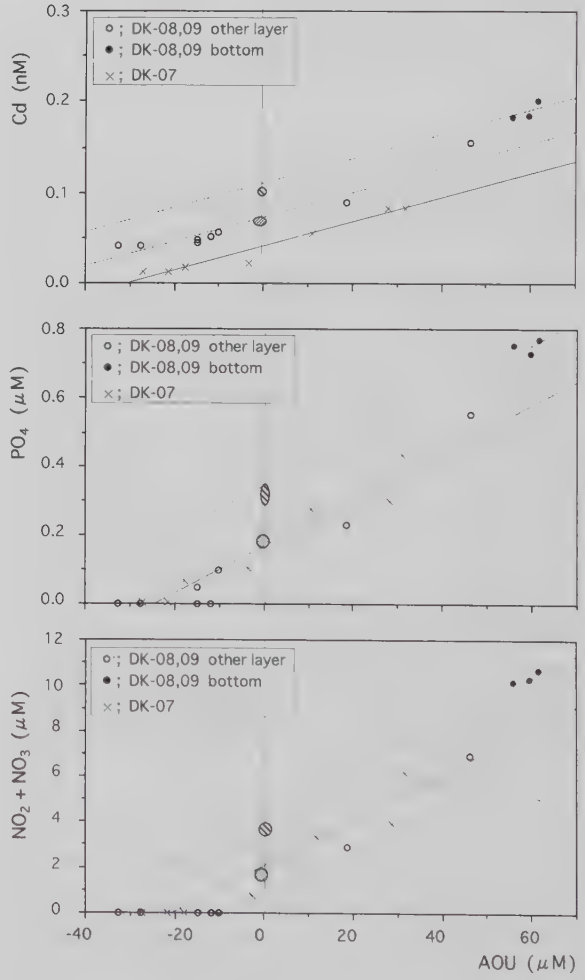


Fig. 2. Relationship between AOU and Cd, PO_4, and NO_2+NO_3. The solid three lines are regression curves at DK-07. The slope of this line was applied to DK-08 and 09 data for the bottom and the other layers and is shown as a broken line in each panel. The hatched area shows the winter concentration level of the bottom (upper) and the other layer (lower) for each constituents.

stations (**Fig. 2**). The y-intercept, namely the concentrations in winter at DK-08 and 09 were around 0.11nM and 0.075nM (Cd), 0.34 μM and 0.16 μM (PO_4), and 4.3 μM and 2.0 μM (NO_2+NO_3) for data near the bottom and for the other layers, respectively. These values generally agree with the concentrations (around 0.1nM and 0.07nM of Cd, 0.3 μM and 0.2 μM of PO_4, and 3.5 μM and 1.8 μM of NO_2+NO_3 for the deep and surface layer, respectively) at the near station to DK-08 and 09 in the winter (Iseki, 1993 ; Abe, unpublished data).

The percentage of the regenerated fractions was calculated by dividing the difference between the observed and the preformed values by the observed concentration. Approximately 70～80% of the apparent regenerated fractions for the three constituents were calculated to be near the bottom layer, which suggested that there was an active supply caused by the remineralization in the bottom layer in this season. Near the bottom at DK-08 and 09, high total carbon concentrations over 2.1m mol l and low pHs below 8.0 were also observed in this study, supporting the idea of the decomposition and remineralization of organic matter in the bottom layer. Tsunogai et al. (1997) showed that the continental shelf zone was a large net source of dissolved inorganic carbon to the ocean, which means that remineralization of biolimiting constituents also occurs actively in the continental shelf zone. The apparent increase in the concentrations in the bottom layer of DK-08 and 09 from winter to summer was around 0.079nM (Cd), 0.41 μM (P), and 6.1 μM (N) (the regeneration ratio was 0.19×10^{-3} : 1 : 14.9). The enhancement in the bottom layer was considered to be the result of the decomposition of the accumulated biogenic particulate matter.

In conclusion, the concentrations of Cd, PO_4, and NO_2+NO_3 in the bottom layer increased at the continental shelf stations in the summer, and these enhancements corresponded to the consumption of dissolved oxygen, which suggested that the apparent increase was attributable to the decomposition and remineralization of biogenic organic matter.

Acknowledgments

I am deeply appreciative of the assistance with the sampling that was provided by the officers and crew of the R／V No. 3 Kaiyo-Maru of Nippon Kaiyo Co., LTD. I would also like to express special thanks to Chief Scientist M. Yamada and other scientists of this expedition. This study was supported by the program for Global Carbon Cycle and Related Mapping Based on Satellite Imagery (GCMAPS), which is funded by the Ministry of Education, Science and Technology of Japan.

References

Abe K., 2000 : Relationship between Cd and PO_4 off the Ryukyu Islands. *Bull. Seikai Natl. Fish. Res. Inst.*, **78**, 49－56 (in Japanese with English abstract).

Abe K., 2001 : Cd in the western equatorial Pacific. *Mar. Chem.*, **74**, 197－211.

Iseki K.(ed.in chief), 1993. Preliminary Cruise Report of K92-09, no pages numbering.

Kudo I., Kokubun H.and Matsunaga K., 1996 : Cadmium in the southwest Pacific Ocean－Two factors significantly affecting the Cd-PO_4 relationship in the ocean－. *Mar. Chem.*, **54**, 55－67.

Kusakabe M., Honda M., and Nakabayashi S., 1998 : Hydrographic feature of the East China Sea. *Bull. Coastal Oceanogr.*, **36**, 5－17 (In Japanese with English abstract).

Pai S. C. and Chen H. Y., 1994 : Vertical distribution of cadmium in marginal seas of the western Pacific Ocean. *Mar. Chem.*, **47**, 81－91.

Redfield A.C., Ketchum B. H. and Richard F.A., 1963 : The influence of organisms on the composition of seawater, in "The Sea" (ed. by Hill M. N.), Vol. 2, Wiley-Interscience, New York, New York, pp.26－77.

Tsunogai S., Watanabe S., Nakamura J, Ono T. and Sato T., 1997 : A preliminary study of carbon system in the East China Sea. *J. Oceanogr.*, **53**, 9－17.

Watanabe Y., Abe K. and Kusakabe M., 1995 : Characteristics of the nutrients distribution in the East China Sea, in "Global Fluxes of Carbon and Its Related Substances in the Coastal Sea-Ocean-Atmosphere System" (ed. by Tsunogai S., Iseki K., Koike I and Oba T.), M & J International, Yokohama, pp.54－60.

水研センター研報，第3号，31－61，平成14年
Bull. Fish. Res. Agen., No. 3, 31－61, 2002

博士号論文

Studies on a Novel Bitter Amino Acid, Pulcherrimine in the Green Sea Urchin Gonads*1

Yuko MURATA*2

Abstract The present study was undertaken to clarify the bitter substance in the green sea urchin gonads. The substance was elucidated to be a novel sulfur-containing amino acid. It was named pulcherrimine after the scientific name of the green sea urchin, *Hemicentrotus pulcherrimus*. The results of the investigation were described in five Chapters.

'Chapter I' described the results of the preliminary examination of this study. The frequency of occurrence of bitter-tasting sea urchins collected from the sea off Iwaki in Fukushima Prefecture was examined. All of the individuals of which the gonads tasted bitter were found to be mature females. This evidence indicates that bitter-tasting gonads are specific to mature ovaries. Free amino acid contents were not significantly different between ovaries and testes. Thus, the possibility of the participation of the bitter tasting amino acids, i.e. Val, Leu and Ile in the bitterness of the sea urchin ovaries was ruled out.

The relation between the tri-monthly changes in the gonad index (GI) and the frequency of bitter gonads of the green sea urchin at the sea off Iwaki was investigated from November 1998 to November 1999. The mean GI value of mature male and female individuals was lowest in May 1999. However, the GI values showed a large variation among mature specimens in each season, therefore, the maturation process of the sea urchins in the sea off Iwaki may vary among individuals. Immature individuals were found in May, August and November 1999, and their percentages were 20%, 60% and 4%, respectively. However, many mature sea urchins were found in all months when examined. These facts indicate that the reproductive cycle seems to be unclear and the occurrence of the mature stage extends over a long term in this area. More than 95% of the mature ovaries had a bitter taste in November 1998, February 1999 and November 1999. In May and August 1999, 60% of the mature ovaries had a bitter taste. In August 1999, 20% of the immature gonads tasted bitter. From these results, the seasonal change in the frequency of bitter ovaries agreed well with that in the distribution of mature ovaries.

'Chapter II' described the isolation of a novel sulfur-containing amino acid from the green sea urchin ovaries, and the elucidation of its structure. This amino acid was named pulcherrimine (Pul).

Ovaries were extracted with 80% aq EtOH and then 20% aq MeOH. The 80% EtOH extract was partitioned between water and diethyl ether. The aqueous layer and the 20% aq MeOH extract were combined and subjected successively to ODS flash chromatography, gel filtration on Sephadex G-10, MPLC on ODS and RP-HPLC. Thirty milligrams of the bitter principle was obtained from 628 g of the starting material.

Molecular weight and the molecular formula of the bitter compound was determined to be 249 and $C_9H_{15}O_5NS$, respectively, by HRFAB-MS. The structure was elucidated as 4-(2'-carboxy-2'-hydroxyethylthio)-2-piperidinecarboxylic acid by ^1H and ^{13}C NMR, ^1H-^1H COSY, HMBC, and HMQC experiments.

2002年1月21日受理（Accepted on January 21, 2002）
水産総合研究センター業績 A 第15号（Contribution No.A 15 from Fisheries Research Agency）
*1京都大学審査学位論文（Ph.D. Thesis, Kyoto University）；掲載に際し投稿規程に沿って一部修正した
*2中央水産研究所 〒236-8648 横浜市金沢区福浦2-12-4（National Research Institute of Fisheries Science, 2-12-4 Fukuura, kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa 236-8648, Japan.）

The absolute stereochemistry was determined by NOE experiments, chiral HPLC analysis and the modified Mosher method. Accordingly, the absolute stereochemistry of Pul was 2'*S*, 2*R*, and 4*S*.

In 'Chapter Ⅲ', a method for determination of Pul in sea urchin gonads was devised. This method consists of the formation of dimethylaminoazobenzenesulphonyl chloride (Dabs-Cl) derivatives of Pul (dabsylation), and separation of the dabsylate using RP-HPLC. The dabsylated Pul was analyzed by RP-HPLC using a linear gradient elution consisting of methanol/aquous acetic acid and methanol/acetic acid mixture after dabsylation. Linearity of the caribration curve for Pul was extremely high ($r=0.994$) in the tested range from 0μg/mℓ to 4μg/mℓ.

The Pul content in the ovary and testis of the green sea urchin collected from the sea off Iwaki in November 1998 was analyzed by this method. The mean Pul content in the ovary was 1.37mg/100 g. On the other hand, no Pul was detected in all testes examined. Correlation between the bitterness and the Pul content was statistically significant.

Individuals with a low pulcherrimine content in their ovaries increased from February to August 1999 and decreased from August to November 1999. These results suggest that the amount of pulcherrimine is related to a seasonal change, probably the maturity of ovaries of the green sea urchin.

'Chapter Ⅳ' described the result of sensory tests for Pul in relation to the thresholds for detection and recognition.

The detection and recognition thresholds determined by a triangle test were 0.17mM and 0.34mM, respectively. Furthermore, by the triangle tests, the thresholds for Pul added to the extracts from the green sea urchin gonads were estimated to be 0.25mM and 0.52mM (immature gonads), 0.22mM and 0.46mM (ovaries), and 0.27mM and 0.46mM (testes), respectively. These findings suggested that the compound exerts remarkable effects of bitter taste on the extracts from both immature and mature green sea urchin gonads.

In 'Chapter V', in order to examine the possibility of differences in receptor mechanisms among bitter substances, behavioral responses to Pul using a conditioned taste aversion (CTA) paradigm in C57BL/6 and BALB/c mice were compared. The behavioral aversion threshold to Pul was determined to be 1.0mM in C57BL/6 mice and 0.1mM in BALB c mice after aversions were conditioned in mice to 4mM Pul. This fact indicated that taste sensitivity to Pul is higher in BALB/c than in C57BL 6 mice.

Generalization patterns across various bitter and other taste stimuli in the two strains of mice suggested that Pul may taste similar to sulfur-containing bitter compounds, but different from any other bitter amino acids and even L-methionine. A hierarchical cluster analysis showed that Pul was grouped with sulfur-containing bitter substances, and SOA, Den and Str.

Key word: sea urchin, bitterness, amino acid, *Hemicentrotus pulcherrimus*, gonad

CONTENTS

Abbreviations
Introduction
Chapter Ⅰ. Occurrence of bitter-tasting sea urchin *Hemicentrotus pulcherrimus* in the sea off Iwaki
Ⅰ－1. The frequency of occurrence of bitter gonads of the green sea urchin
Ⅰ－2. Seasonal changes in the frequency of occurrence of bitter-tasting sea urchin
Chapter Ⅱ. Isolation and structure elucidation of a novel bitter amino acid, pulcherrimine, from the green sea urchin ovaries
Ⅱ－1. Isolation from the green sea urchin ovaries
Ⅱ－2. Chemical structure

Ⅱ－3. Stereochemistry
Chapter Ⅲ. Determination of pulcherrimine in the green sea urchin gonads
Ⅲ－1. Examination of a method for analysis
Ⅲ－2. Correlation between bitterness and content
Ⅲ－3. Seasonal change in content
Chapter Ⅳ. Sensory tests for pulcherrimine
Ⅳ－1. Detection and recognition thresholds
Ⅳ－2. Thresholds in the extracts from sea urchin gonads
Chapter Ⅴ. Behavioral responses to pulcherrimine using the CTA paradigm in C57BL 6 and BALB c mice
Ⅴ－1. Behavioral thresholds in C57BL/6 and BALB/c mice
Ⅴ－2. Behavioral responses using the CTA paradigm in C57BL/6 and BALB/c mice
Conclusion
Acknowledgments
References

Abbreviations

Ac_2O	acetic anhydride
AcOH	acetic acid
Boc_2O	*di-t*-butyl dicarbonate
BuOH	*n*-butanol
COSY	correlation spectroscopy
DMF	*N, N*-dimethylformamide
EtOAC	ethyl acetate
EtOH	ethanol
HMBC	^{1}H-detected multiple-bond heteronuclear multiple quantum coherrence
HMQC	^{1}H-detected multiple quantum coherrence spectrum
MeCN	acetonitrile
MeI	methyl iodide
MeOH	methanol
MPLC	medium pressure liquid chromatography
NOE	nuclear Overhauser effect
NOSY	nuclear Overhauser and exchange spectroscopy
SD	standard deviation
SE	standard error
TEA (Et_3N)	triethylamine

Introduction

Sea urchin gonads are one of the most popular sea foods in Japan, due to its peculiar thick taste. The annual catch of sea urchin in Japan amounts to approximately thirteen thousand tons (FAO, 1996). The gonads are eaten in a variety of ways : raw, steamed, grilled, salted and so on. The green sea urchin (*Hemicentrotus pulcherrimus*), *'Bafun-uni'* in Japanese, is widely distributed among the Japanese costal areas. It is one the most important fishery products on the south-west coasts of Japan. It has long been regarded that the green sea urchin is the most suitable species as a raw material for salted sea urchin gonads. The product as such called *'Echizen Uni'* is a speciality of Fukui Prefecture (Kawana, 1938). Therefore, there is increasing interest in the reproductive biology of the green sea urchin, and there are many reports on the reproductive biology of this organism at the sea off Fukui (Kawana, 1938 ; Matsui, 1966).

Komata *et al.* (1962a ; 1962b ; 1962c ; 1964) investigated the extractive components of the edible gonads of the green sea urchin, and specified the certain taste-active components in the extracts. That is, they elucidated that Gly and Ala contribute to the sweetness, Val to the characteristic bitterness of the taste of green sea urchin gonads, and Leu and Ile have a similar role as Val. However, green sea urchin of which the gonads taste extremely bitter are often found in the catch in the Tohoku area, for example, Fukushima Prefecture. Such sea urchins are not acceptable as food and have no commercial value.

Another unpleasant taste : pungent taste, which often occurs in frozen sea urchin gonads was found to be due to carbonyl compounds (Miwa 1975). These compounds are considered to be derived from amino acids by a transaminase reaction, from lipids by oxidation, or from acetal lipids by hydrolyzation during the frozen strage. It was also reported that the gonads of cultured sea urchin which are fed high protein content feed sometimes

taste bitter, and the bitterness might be attributable to certain bitter amino acids formed (Hoshikawa, 1998).

Numerous substances which elicit a bitter taste have so far been determined and the structures of the bitter substances are extremely diverse. It has been considered that several receptor and transduction mechanisms are involved in the bitter taste stimulus, however, such mechanisms have not been clarified yet and the study of such mechanisms is now in progress. As to the transduction mechanisms on bitter reception, several different pathways have recently been proposed : bitter responses occur via the inhibition of the K^+ channel, production of IP_3, activation of gustducin, and binding of bitter substances to the lipid layers of the taste receptor membranes (Kashiwayanagi and Kurihara, 1999). On the other hand, from the view point of the utilization of bitter substances as food and/or medicine, the investigation of the mechanisms of receptor and transduction should prove to be important.

The present study was undertaken to clarify the bitter substance in green sea urchin gonads. First of all, the frequency of occurrence of the bitter-tasting sea urchins collected in the sea off Iwaki in Fukushima Prefecture was preliminarily examined. Secondly, a substance responsible for the bitterness was isolated, and subsequently, it was elucidated to be a novel sulfur-containing amino acid by determining of its chemical structure. Thus it was named pulcherrimine (Pul) after the scientific name for the green sea urchin, *Hemicentrotus pulcherrimus*. Thirdly, a method for the determination of Pul in the sea urchin gonads was devised. This method consists of the formation of dimethylaminoazobenzensulphonyl chloride (Dabs-Cl) derivatives of Pul (dabsylation), and the separation of the dabsylate using reversed-phase high-performance liquid chromatography. Lastly, the taste quality and the threshold for Pul were examined by sensory tests by a panel, and behavioral experiments using experimental animals.

Chapter I
Occurrence of bitter-tasting sea urchin *Hemicentrotus pulcherrimus* in the sea off Iwaki

The green sea urchin *Hemicentrotus pulcherrimus* is widely distributed in Japan. This species of sea urchin is one of the important coastal fishery products of south-west Japan. However, this resource on the northeast coasts (i.e., Fukushima Prefecture) is hardly utilized. In the sea off Iwaki, Fukushima Prefecture, green sea urchins with bitter tasting gonads are often found and the sea urchins as such have little commercial value. In the Iwaki area, grilled sea urchin gonads called *'Kaiyaki'* is a particular local favorite food. However, for *'Kaiyaki'*, the northern purple sea urchin (*Strongylocentrotus nudus*) is used instead of the green sea urchin. The bitterness of the green sea urchin gonad seems to be perceived as a pungent or an astringent taste, expressed by the word *'egumi'* in Japanese.

There are some reports on unpleasant tastes of sea urchin gonads of which the causes have been ascribed to bitter amino acids and carbonyl compounds. Northen purple sea urchin fed with sand lance *Ammodytes personatus* also sometimes has bitter tasting gonads. In this case, the bitter taste has been proved to be attributable to bitter amino acids, such as valine, leucine, isoleucine, etc. (Hoshikawa *et al.*, 1998). Miwa (1974) reported that the pungent taste of sea urchin gonads which were frozen-stored and then thawed was brought about by certain carbonyl compounds.

There are neither any studies on the occurrence of bitter substances other than amino acids or carbonyl compounds, nor any studies dealing with the frequency of the bitter tasting green sea urchin which are caught in the sea off Iwaki.

This chapter deals with the results of preliminary observations on the occurrence of green sea urchins with bitter tasting gonads inhabit at the sea off Iwaki, Fukushima Prefecture. Section 1 describes the results of duplicate preliminary examinations on the frequency of occurrence of bitter tasting green sea urchin in March 1996 and March 1997, when it is the period of maturity of this species of sea urchin. The second section details the results of tri-monthly examinations on the frequency of bitter tasting gonads during the period November 1998 to November 1999 in the same area.

I－1. The frequency of occurrence of bitter go-

nads of the green sea urchin

The green sea urchin is one of the edible species of sea urchin. However, in the Iwaki area of Fukushima Prefecture, this species of sea urchin is hardly the target for fisheries because of the bitter-taste of its gonads. Other than the Iwaki area, in southern Hokkaido, a similar fact that green sea urchins which have bitter tasting gonads (Agatsuma, 1992) is known.

In the first step of this study, the frequency of occurrence of bitter tasting gonads in the green sea urchin inhabits in the sea off Iwaki was examined. The bitterness of the sea urchin gonads was tested by a sensory test using a small pieces of the tissue of individual gonads. Simultaneously, the gonad extracts were analyzed for amino acids to examine the possibility of their contribution to the bitterness of the gonads.

Materials and Methods

Green sea urchin

Green sea urchins were collected from the sea off Iwaki, Fukushima Prefecture in March 1996 and March 1997, the number of specimens collected were 94 and 99, respectively. Their gonads were dissected out, after the size and the weight were measured. The gonad index (GI) of each sample was calculated by the follows equation :

$$GI\ (\%) = (\text{gonad weight} / \text{body weight}) \times 100$$

Preparation of extracts

The gonads from individuals, after a small piece of the gonad tissue was separated for the sensory test of the bitterness, were separately homogenized with three volumes of 80% aq EtOH. The residue was re-extracted twice with three volumes of 80% EtOH. The homogenate was centrifuged at 1700× *g* for 10min. The combined 80% EtOH extracts were evaporated to a small quantity and partitioned between water and diethyl ether. The aqueous phase was concentrated to 5mℓ under reduced pressure.

Free amino acid analysis

Free amino acid analysis was performed with a Hitachi L-8500A amino acid analyzer (Murata *et al.*, 1998).

Brief sensory test

The gonads were briefly tested for bitterness by tasting small tissue pieces (20－30㎎) taken from the gonads (this test is called a brief sensory test for convenience). The brief sensory test was carried out by three experienced subjects.

Results and Discussion

Table 1 shows the frequency of occurrence of bitter gonads in the green sea urchins collected from the sea off Iwaki, Fukushima Pref. in March 1996. All specimens were judged to be mature and their sex was readily distingushed by the oozed gametes (Fuji, 1960). Male and female sea urchins were almost identical in the biological data such as test diameter, test height, body weight, gonad weight and gonad index. Ninety-five percent of the female individuals had bitter ovaries, while none of the male individuals had bitter testes. In March 1997, all of the individuals of which the gonads gave a bitter taste were found to be female. These results suggest that the bitterness of the green sea urchin is specific to the mature ovaries. The free amino acid (FAA) analysis of both male and female gonads, showed that there is no significant difference in the contents of bitter amino acids such as Val, Ile, Leu between the non bitter testes and the bitter ovaries (**Table 2**). This fact ruled out the possibility of the participation of

Table 1. The frequency of occurrence of bitter gonads in green sea urchins together with biological data

	Male	Female
Number of specimens (A)	50	44
Bitter gonad (B)	0 (0%) †	42 (95%) †
Test height (㎜) †1	20.0±2.7	19.7±2.8
Test diameter (㎜) †1	37.9±3.8	37.6±4.0
Body weight (g) †1	22.1±1.1	21.7±6.4
Gonad weight (g) †1	2.4±1.1	2.5±1.0
Gonad index (%) †1, †2	10.8±4.5	11.2±4.5

† Number of specimens having bitter gonads. Values in parentheses are frequency (B/A×100%)

†1 Mean ± standard deviation

†2 Gonad weight body weight×100

Table 2. Free amino acids in the extracts of the sea urchin gonads (mg 100 g) †

	Testis	Ovary
Glutamic acid	102.8± 8.4	43.4± 15.0
Glycine	779.2±136.4	1019.2±209.3
Alanine	151.8± 58.3	94.4± 22.1
Valine	42.4± 39.8	36.2± 30.9
Methionine	19.0± 12.2	17.4± 12.1
Isoleucine	29.8± 26.3	32.4± 23.8
Leucine	46.8± 48.8	41.6± 38.5
Tyrosine	35.7± 24.5	37.8± 25.5
Phenylalanine	29.8± 27.5	29.5± 23.8
Tryptophan	15.8± 13.8	9.8± 5.7
Arginine	50.2± 40.5	91.9± 34.4
Proline	37.3± 21.5	17.1± 8.1
Total FAA	1632.5±150.3	1723.4±152.1

† Mean ± SD (n = 5).

the bitter amino acids being the case of the bitterness of the sea urchin ovaries. The bitterness was perceived in the water soluble fraction, instead of the ether fraction. Therefore, another possibility that the bitter principle may be due to carbonyl compounds was denied, because such carbonyl compounds are soluble in ether.

I −2. Seasonal changes in the frequency of occurrence of bitter-tasting sea urchin

In the preceding study (Section I-1), the frequency of occurrence of bitter gonad in the green sea urchin was examined in March 1996 and March 1997. The results indicated that the bitterness of the green sea urchin gonads was specific to mature ovaries. In March (1996 and 1997), all the individuals collected from the sea off Iwaki were mature. Fuji (1960) divided the development process of the gonads of the two species of sea urchins, *Strongylocentrotus nudus* and *S. intermedius*, into six stages by histological and anatomical observations. Matsui (1966) and Ito (1989) found that green sea urchin in Fukui Prefecture and Saga Prefecture has a clearly defined annual reproductive cycle.

In this study, tri-monthly examinations were carried out to clarify the seasonal changes in the maturity and the frequency of occurrence of bitter tasting gonads of green sea urchins inhabit in the sea off Iwaki in Fukushima Prefecture.

Materials and Methods

Green sea urchins

At intervals of every three months from November 1998 to November 1999, 100 green sea urchins (*H. pulcherrimus*) were randomly collected from the sea off Iwaki, Fukushima Prefecture. This sampling will here after be called tri-monthly sampling for convenience. As soon as the specimens collected were carried to the laboratory, the biological factors were measured and the gonads were dissected out as described in the preceding section. The gonad index (GI) of each individual was also calculated by the same equation as mentioned in the preceding section :

GI (%) = (gonad weight body weight) × 100

Determination of sex and maturity

In this study, the sampled green sea urchins were divided into mature and immature individuals. Mature individuals were defined in this study as those with gametes which ooze from the gonads. Immature individuals were defined as those with gametes which do not ooze from the gonads. The sex of the mature individuals was identified from the oozed ganetes (Fuji 1960).

Histological observations

Four to seven immature individuals collected every three months were histologically observed in order to determine the stage of their gonadal development. Small pieces of gonad from each individual were fixed in Bouin's solution, embedded in paraffin, and sectioned at 6μm thick. The sections were stained with hematoxylin and eosin, and then observed with an optical microscope to determine the sex and gametogenic stage of the gonads. The gonadal maturity of each individual was assessed according to the stage classification initially proposed by Fuji (1960) modified slightly by Unuma *et al.* (1996). The stage classification is as follows :

Stage 0 (neuter) : No obvious germ cells are observed. Sexes are unidentified.

Stage 1 (developing virgin or recovering spent) :

A few young oocytes or small clusters of spermatogenic cells are present along the inside of the follicle walls. Nutritive phagocytes occupy the follicular lumens.

Stage 2 (growing) : Follicle walls are lined with oocytes or spermatocytes. The center of the lumens are still filled with nutritive phagocytes.

Stage 3 (pre-mature) : In the center of the lumen, nutritive phagocytes are replaced with a number of oocytes or small masses of spermatozoa.

Stage 4 (mature) : Follicular lumens are filled with large numbers of mature eggs or spermatozoa. Nutritive phagocytes are recognized only in the periphery of follicle.

Stage 5 (spent) : Follicular lumens are almost empty with a few relict eggs or small masses of relict sperm.

Preparation of extracts

Every gonad was separately homogenized with an equal volume of water, after a small piece of the gonad tissue was separated for the sensory test. The homogenates were heated at 100℃ for 12min. After being cooled, the homogenate was centrifuged at 1700× g for 10min. Fifty microliters of the supernatant were subjected to the judgement of bitterness, and the remainder was transferred to a volumetric flask (10mℓ or 50mℓ). The precipitate was re-extracted twice, first with two volumes and then one volume of water, respectively, in the same manner as above. The extracts were combined in the volumetric flask and filled up to the mark with distilled water and were frozen-stored below −30℃ until use.

Sensory tests

Firstly, the gonads were applied to a brief sensory test by the same manner as Section I-1. After a brief test, all extracts of the gonads was examined for the bitterness by three experienced subjects.

Statistical analysis

The G I of the tri-monthly samples between November 1998 and November 1999 were statistically analyzed. The analysis was performed by the *F*-test for the difference of the variance in each month. When the variance was equal between tri-monthly samples, the *t*-test was applied, while when the variance was different, the Cochran-Cox test (Wakabayashi, 1984) was applied.

Results

The frequency of occurrence of mature male, female, and immature sea urchins

Table 3 shows the frequency of mature male, female, and immature green sea urchins. In November 1998 and February 1999, all of the sea urchins examined were mature, and thus the sex of each individual was easily distinguished. The frequency of female sea urchins was 40%. That of the male sea urchins was, naturally, 60%. In May and August 1999, the frequency of immature individuals was relatively high : 20% and 60%, respectively. Seven specimens from each sample out of the immature individuals collected in May and August 1999 were subjected to a histological observations. These observations revealed that these individuals were at the recovering spent stage (Fuji, 1960). The frequency of mature males was 50% and 20%, in May and August, respectively, and that of mature females was 30% and 20%, respectively. In November 1999, 56% of individuals were identified as male and 40% as female. Four immature individuals were identified as females by microscopic observations : two of them were judged to be at the growing stage, and the other two at the pre-mature stage.

Test diameter, test height, body weight

The mean test diameter, test height and body

Table 3. The frequency of occurrence of mature male and female, and immature sea ruchin†

	Mature		Immature††
	Male	Female	
November 1998	56	44	0
February 1999	57	43	0
May 1999	50	30	20
August 1999	20	21	59
November 1999	56	40	4

† As the figures expres the number of relevant specimens out of 100 specimens collected at the same time, they mean the percentage of cases.

†† Gametes did not ooze from the gonads and the sex identification was impossible.

weight of individuals were approximately the same through the observations for the five months, i.e. 22mm, 41mm and 23 g, respectively (**Table 4**).

Seasonal changes in the gonad index

Seasonal changes in the G I of each sex of the sea urchin are shown in **Fig. 1.** The G I values varied considerably among the mature specimens in each season. The mean G I values of the mature male and female gonads decreased significantly from February to May, and significantly increased from May to August. This fact suggests that spawning occurrs from February to May. The G I was smallest in May for both sexes. It is equally true in the both sexes. The G I of the immature specimens in May, August and November 1999 was 8.3±0.8 (%), 12.7±0.5 (%) and 7.5 ±1.0 (%) (mean±SE). These values were lower than that of the mature specimens.

The frequency of occurrence of bitter tasting gonads of the green sea urchin in the different seasons

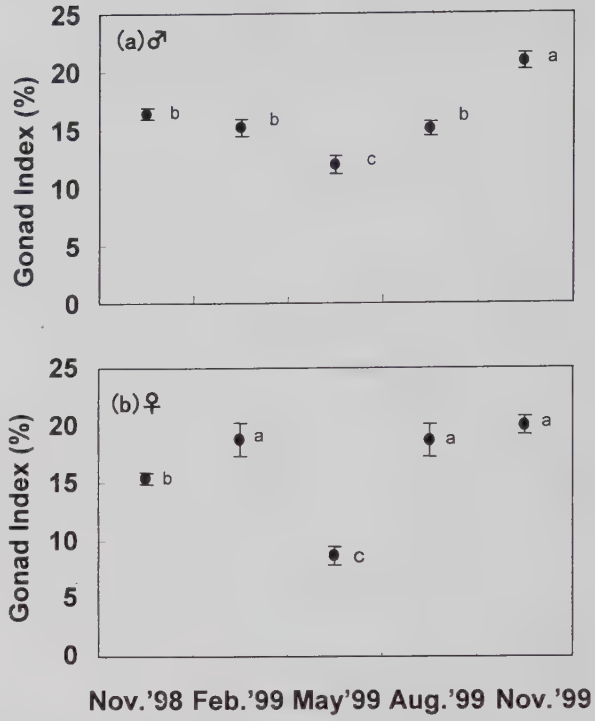


Fig. 1. Seasonal changes in the gonad index (mean±SE) of (a) mature male and (b) mature female of green sea urchin inhabits in the sea area off Iwaki. Among supplementary letters, a, b, c, the mean values are significantly differs each other ($p<0.05$).

Table 4. Test hight, test diameter and body weight of green sea urchin from November 1988 to November 1999

	Month	Test height (mm)†	Test diameter (mm)†	Body weight (g)†
Mature male	Nov 1998	22.1±2.0	41.6±2.8	21.1±4.9
	Feb 1999	22.5±2.8	41.3±3.9	24.9±4.5
	May 1999	23.4±2.8	43.3±4.1	26.5±8.7
	Aug 1999	22.1±2.2	40.6±3.2	23.2±5.3
	Nov 1999	21.7±1.8	41.6±2.9	23.6±5.6
	mean±SD	22.4±2.4	41.8±3.4	23.9±5.9
Mature female	Nov 1998	22.1±1.6	41.9±3.3	21.6±4.5
	Feb 1999	22.3±1.6	40.9±2.8	23.4±4.5
	May 1999	21.8±1.4	41.2±2.1	22.3±3.2
	Aug 1999	21.0±2.0	39.0±3.4	20.8±4.7
	Nov 1999	21.9±1.6	40.9±2.6	22.5±4.5
	mean±SD	21.9±1.6	41.0±2.8	22.3±4.3
Immature	May 1999	23.5±2.7	43.4±3.3	27.0±6.7
	Aug 1999	22.1±2.0	40.9±3.0	23.5±5.7
	Nov 1999	22.3±0.1	40.5±0.1	24.2±1.6
	mean±SD	22.4±2.1	41.3±3.0	24.2±5.9

† Mean±SD.

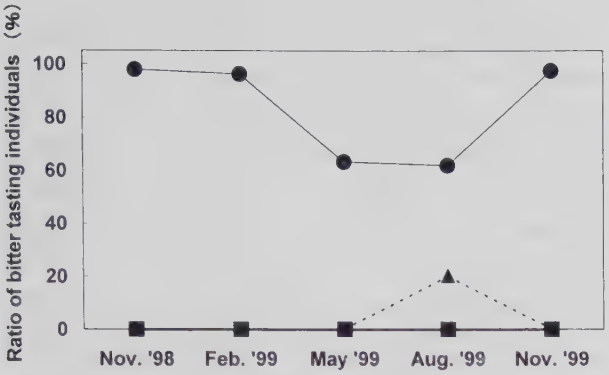


Fig. 2. Frequency of bitter tasting gonad observed at intervals of three months ; mature males (■), mature females (●) and immature individuals (▲).

Figure 2 shows the frequency of occurrence of bitter gonads in each season. More than 95% of the ovaries of sea urchin collected in November 1998, February 1999 and November 1999 tasted bitter. On the other hand, in May and August 1999, 60% of the mature ovaries were bitter. Immature gonads had no bitter taste in May and November, but 20% of the immature gonads in August 1999 tasted bitter.

Discussion

The maturation mode of green sea urchins which inhabit in the sea off Iwaki was examined based on the frequency of occurrence of mature individuals and the variation in G I throughout the period from November 1998 to November 1999. The fact that the G I values showed a large variation among the mature specimens in each season indicates that the maturation process of the sea urchins might vary among individuals. The mean G I values of gonads were observed to decrease significantly during the period between February to May 1999, were at the lowest values in May 1999, and increase thereafter. This change in the G I suggests that the major spawning season is in the period from February to May.

In May and August 1999, many immature sea urchins were observed, but, simultaneously, many mature female and male individuals were also observed. This suggests that mature individuals occur in all seasons in the sea off Iwaki. From the variation of the individual G I values and the presence of mature individuals in all seasons, the reproductive cycle of this species of sea urchin seems to be unclear, and the occurrence of the mature stage extends over a long term, at least, in this sea area.

The maturation and subsequent spawning behavior are generally considered to be controlled by the sea water temperature (Agatsuma, 1992). Ito *et al.* (1989) described for the green sea urchin that a temperature depression after a high water temperature period accelerates the maturation of gonads. In the sea area off Saga Pref., it is observed that spawning starts when the water temperature drops to 15℃. In the sea off Iwaki, the water temperature remains over 20℃ from August to October. In September, the water temperature reaches its highest value and then declines. From December to June, the water temperature is usually below 15℃ (Monthly Ocean Report, Dec. 1999). Therefore, the variation of the maturation process and the long term maturation period among individual sea urchins in the sea off Iwaki may be due to the relatively low water temperature.

The frequency of occurrence of bitter ovaries accounted for more than 95% of the total examined in November 1998, February 1999 and November 1999, and 60% of the total mature ovaries, even in May and August 1999. From these results, the seasonal change in the frequency of occurrence of bitter ovaries agreed well with that of the distribution of mature ovaries.

Chapter Ⅱ
Isolation and structure elucidation of a novel bitter amino acid, pulcherrimine, from the green sea urchin ovaries

At the sea off Iwaki, Fukushima Prefecture, green sea urchins with bitter-tasting gonads are often found. In the preceding study (Section Ⅰ-1), the frequency of occurrence of the bitter-tasting sea urchin was examined. The results indicated that the bitterness of the green sea urchin gonads was specific to the mature ovaries. The bitter taste of the sea urchin ovaries has been thought to be due to the presence of such free amino acids as valine, leucine and isoleucine. (Hashimoto, 1965 ; Fuke *et al.*, 1991). Free amino acid contents are not significantly different between ovaries and testes. Thus, the bitter principle was predicted to differ from that of the bitter amino acids mentioned

above (Section I-1).

The present Chapter describes isolation and structure elucidation of the bitter substance from the green sea urchin ovaries.

Ⅱ－1. Isolation from the green sea urchin ovaries

The preceding study showed that the bitterness of the green sea urchin gonads was specific to mature ovaries. This section describes the isolation of pulcherrimine (Pul) from green sea urchin ovaries using bioassay (sensory test) -guided fractionation.

Materials and Method

Green sea urchin

Green sea urchins were collected from the sea off Iwaki, Fukushima Prefecture, during the period from March to June in 1997 and 1998, when most of the gonads were mature. After dissection, the ovaries were stored at －84℃ until used.

Apparatus

HPLC separations were performed with a Shimadzu LC-10ADvp liquid chromatograph equipped with a Shimadzu RID-6A refractive index detector, a YMC pack R&D ODS column, and a Reodyne injector.

Analytical TLC was carried out on MERCK Kieselgel plates $60F_{254}$ in 0.25㎜ thick. Chromatograms were visualized by either ninhydrin or sulfuric acid.

Extraction and Isolation

Frozen ovaries (628 g) were homogenized and extracted with 80%aq EtOH (1.8 ℓ ×3). The homogenate was centrifuged at 7,500× *g* for 15min. The pellet was further extracted with 20% aq MeOH (0.9 ℓ ×3). The 80% aq EtOH extracts were evaporated and partitioned between water and diethyl ether. The aqueous phase and 20% aq MeOH extracts were combined and concentrated under reduced pressure. Isolation of Pul was carried out by monitoring the bitterness using a brief sensory test. The taste of a small quantity of the solutions was determined by the authors. When fractions were 1% AcOH solutions, each solution was evaporated to eliminate AcOH and dissolved in equal volume of distilled water for sensory tests. The residue (34.7 g) was chromatographed on an ODS column (Cosmosil $140C_{18}$-prep, 50×500㎜) with distilled water. The active fractions were separated by gel filtration on Sephadex G-10 (Amersham Pharmacia Biotech Co.Ltd., 26.4×1000㎜) with distilled water. The bitter fraction (7.7 g) was fractionated by ODS column chromatography (Cosmosil $140C_{18}$-prep, 30×800㎜) with 1% aq AcOH. The active fractions were combined (4.8 g) and purified by preparative HPLC on a YMC-Pack R&D ODS column (20×250㎜) with 1% AcOH (flow rate, 5 mℓ/min) monitoring with a refractive index detector to yield a bitter principle [30.0mg, 4.8×10^{-3}% based on wet weight ; TLC on silica gel, R_f 0.12 (*n*-BuOH/AcOH/H_2O, 4 : 1 : 2)] as amorphous white powder (**Fig. 3**).

Results and Discussion

The sea urchin ovaries (628 g wet weight) were extracted with 80% aq EtOH and then with 20%

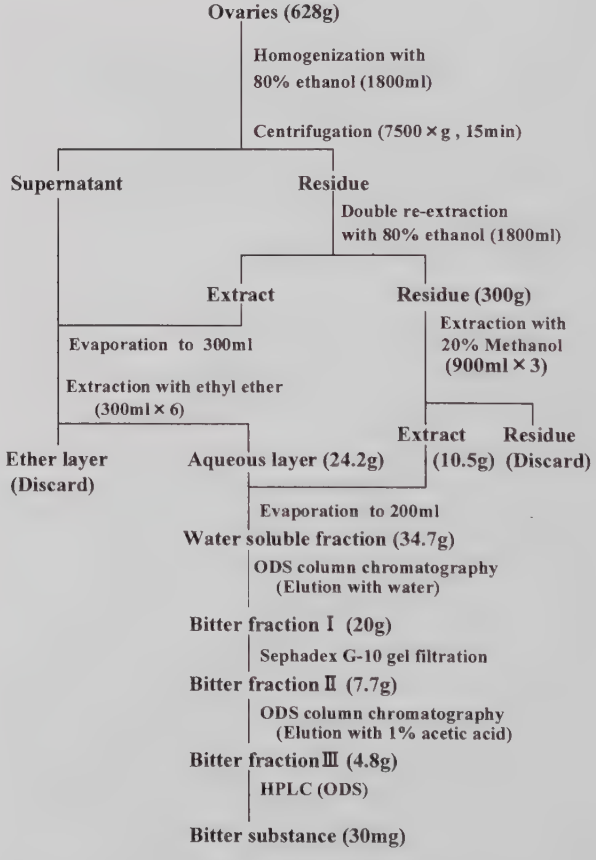
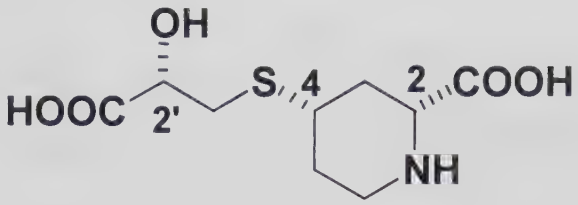


Fig. 3. Isolation of a bitter substance from the green sea urchin ovaries.

aq MeOH. The 80% aq EtOH was partitioned between water and diethyl ether. The aqueous layer and 20% aq MeOH extract were combined and separated by ODS flash chromatography, followed by gel-filtered on Sephadex G-10 with H_2O. Bitter fractions were further fractionated by MPLC and purified by HPLC on ODS with 1% aq AcOH to yield Pul (30.0mg) as amorphous white powder.



Pulcherrimine (1)

Fig. 4. A structure of pulcherrimine (**1**).

Ⅱ－2. Chemical structure

In the preceding section, a bitter principle (Pul) was isolated from the green sea urchin ovaries. Subsequently, this section describes the chemical structure elucidation of pulcherrimine (**1**) by spectroscopic and chemical methods. (The stereochemistry of **1** is described in the next section (Section Ⅱ-3).

Materials and Methods

Apparatus

ESI-MS and FABMS were recorded with a Micromass QUATTRO Ⅱ and a JEOL JMX-SX102 mass spectrometer using thioglycerol as matrix, respectively. 1D and 2D NMR spectra were recorded either on a JEOL JNM-α600 (600MHz for ^1H, 125MHz for ^{13}C) or a JEOL GX-270 (270MHz for ^1H, 67.5MHz for ^{13}C) NMR spectrometers at 300K. ^1H chemical shifts were referenced to residual solvent peaks : TMS (δ_H 0.00) in $CDCl_3$ (internal standard), CD_2HOD (δ_H 3.30) in CD_3OD and D_2O (internal standard). ^{13}C chemical shifts were referenced to solvent peaks : δ_C 77.0 in $CDCl_3$, δ_C 49.0 in CD_3OD and D_2O (internal standard). The distortionless enhancement by polarization transfer (DEPT) experiments were performed using a transfer pulse of 135° to obtain positive signals for CH and CH_3 and negative ones for CH_2 groups. ^1H-^1H COSY, HMBC and HMQC experiments were performed using conventional pulse sequences (Bax *et al.*, 1986 ; Summers *et al.*, 1986).

Optical rotation was measured on a JASCO DIP-371 digital polarimeter.

Analytical TLC was carried out on MERCK Kieselgel plates $60F_{254}$ in 0.25mm thick. Chromatograms were visualized by either ninhydrin or sulfuric acid.

Determination of a planer structure of 1

A planer structure of **1** (**Fig. 4**) was determined by HRFABMS data, and 1 D and 2 D NMR spectral data.

Pulcherrimine (**1**) : $[\alpha]^{24}_D$ −16.5° (*c* 0.20, H_2O) ; TLC on silica gel, R_f 0.12 (*n*-BuOH/AcOH/H_2O, 4 : 1 : 2) ; ^1H NMR in D_2O/CD_3OD (40 : 1) at 600MHz δ 4.19 (1 H, dd, J = 6.7, 3.8Hz, H 2'), 3.64 (1 H, dd, J = 12.7, 3.1, H2), 3.49 (1H, ddd, J = 13.1, 4.2, 2.3, H6α), 3.08 (1 H, m, H 4), 3.06 (1H, dd, 13.8, 3.8, H1'b), 3.03 (1H, m, H6β), 2.90 (1H, dd, J = 13.8, 6.7, H1'a), 2.58 (1 H, ddd, J = 14.2, 6.2, 3.1, H3β), 2.25 (1H, m, H5β), 1.63 (1H, m, H5α), 1.61 (1H, dd, J = 14.2, 12.7, H3α) ; ^{13}C NMR in D_2O/CD_3OD (40 : 1) at 67.5MHz δ 180.0s(COOH-2'), 174.2s(COOH-2), 72.3d(C 2'), 60.0d (C 2), 44.1t (C 6), 39.6 (C 4), 35.2t (C 1'), 34.3t(C 3), 29.8t(C 5) ; ESIMS(rel. ext) : 248 [24, $(M-H)^-$], 195 (6), 159 (16), 145 (100), 133 (8), 131 (19), 89 (31), 87 (8), 59 (9) ; FABMS (rel. ext) : m/z 250 [25, $(M+H)^+$], 204 (15), 162 (22), 128 (48), 82 (98). HRFABMS (matrix : thioglycerol) : obsd. $(M+H)^+$ m/z 250.0749 ($C_9H_{16}NO_5S$, Δ +0.5mmu).

Preparation of Boc derivative 2

Pul (**1**, 1.8mg, 0.007mmol) was converted to triethylamine (TEA) salt by treating with 0.5mℓ of TEA and 0.05mℓ of H_2O twice. The salt in 0.5mℓ of TEA/MeOH (1 : 1) was treated with $(Boc)_2O$ (5.0mg, 0.030mmol). The mixture was warmed to 50℃ and stirred for 24 h, and the reaction mixture was evaporated to afford a Boc derivative **2** (2.5mg) as a yellow oil. **2** : ^1H NMR in CD_3OD at 270MHz δ 4.50 (1 H, brs, H 2), 3.76 (1H, m, H6α), 3.35 (1H, m, H6β), 1.40 [9H, s, $-C(CH_3)_3$].

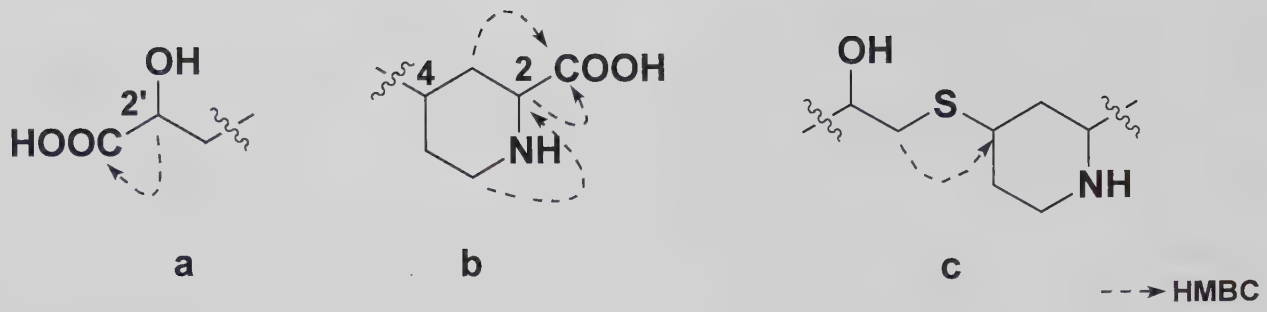


Fig. 5. Partial structures and HMBC correlations.

Preparation of dimethyl ester derivative 3

A mixture of the Boc derivative **2** (1.25mg, 0.0036mmol), DMF (0.5mℓ), MeI (1μℓ, 0.016mmol) and $NaHCO_3$ (5mg, 0.06mmol) was stirred overnight at room temperature. The reaction mixture was neutralized with 0.05N HCl, and extracted with diethyl ether. The ether layer was purified by column chromatography on silica gel (Wakogel C-300) with hexane/EtOAc (1 : 1) to afford a dimethyl ester **3** (0.2mg). **3** : ^{1}H NMR in CD_3OD at 270MHz δ 4.65 (1H, brs, H2), 4.40 (1H, dd, J = 6.2, 4.2Hz, H2'), 3.80 (3H, s, $-OCH_3$), 3.72 (3H, s, $-OCH_3$).

Preparation of monoacetate 4

The dimethyl ester **3** (0.2mg) was acetylated with pyridine (100μℓ) and acetic anhydride (100μℓ) at room temperature for 7 h. The reaction mixture was evaporated to afford the monoacetate **4** quantitatively. **4** : ^{1}H NMR in CD_3OD at 270MHz δ 5.21 (1H, dd, J = 7.1, 4.9Hz, H2'), 2.16 (3H, s, $-OCOCH_3$).

Results and Discussion

Pul (**1**) had a molecular formula of $C_9H_{15}NO_5S$ as determined by HRFABMS [m/z 250.0749 $(M+H)^+$, Δ +0.5mmu] and ^{13}C NMR data. The ^{1}H NMR spectrum displayed three methines [δ_H 4.19 (1H, dd, J = 6.7, 3.8Hz), 3.08 (1H, m), and 3.64 (1H, dd, J = 12.7, 3.1)] and eight nonequivalent methylene signals [δ_H 3.49 (1H, ddd, J = 13.1, 4.2, 2.3), 3.06 (1H, dd, 13.8, 3.8), 3.03 (1H, m), 2.90 (1H, dd, J = 13.8, 6.7), 2.58 (1H, ddd, J = 14.2, 6.2, 3.1), 2.25 (1H, m), 1.63 (1H, m), and 1.61 (1H, dd, J = 14.2, 12.7)]. The ^{13}C NMR spectrum together with a DEPT experiment revealed that Pul (**1**) contained 3×CH (δ_C 72.3, 60.0, and 39.6) and 4×CH2 (δ_C 44.1, 35.2, 34.3, and 29.8), in addition to two carbonyl carbons (δ_C 180.0 and 174.2). Pul (**1**) was stable in the 6 N HCl solution at 110℃, suggesting that **1** had the absence of peptidic and/or esteric bonds. Therefore, two carbonyl carbons were both carboxyl groups. Interpretation of the COSY, HMQC and HMBC spectra led to partial structures **a** and **b** (**Fig. 5**). Chemical shift for C2' (δ_H/δ_C 4.20 72.3) and an HMBC cross peak between H2' and a carboxyl carbon at δ 180.0 led to unit **a**. The chemical shifts of C2 and C6 were typical for nitrogen-substituted methine and methylene carbons, respectively. Interpretation of the COSY spectrum starting from an nitrogen-bearing methine at δ 3.64 (H2) led to connectivities from H2 to H6. HMBC cross peaks between H6α/C2, and H2 and H3α a carboxyl carbon at δ 174.2 resulted in unit **b**. The remaining 32 mass unit in the FAB mass spectrum corresponded to one sulfur atom, whose presence was evident from HRFABMS of pseudomolecular ion at m/z 250. An HMBC cross peak between H1' and C4 (partial structure **c**, **Fig. 5**) as well as chemical shifts for C1' (δ_H δ_C 2.90 and 3.06 35.2) and C4 (3.08 39.6) revealed connectivity between units **a** and **b** through a sulfide bond to establish the gross structure of **1**, 4-(2'-carboxy-2'-hydroxyethylthio)-2-piperidinecarboxylic acid.

Chemical transformation was carried out to confirm the proposed structure by the procedure shown in **Fig. 6**. The presence of two carboxyl groups were confirmed by production of the dimethyl ester upon treatment with MeI under a basic condition (Bocchi *et al.*, 1979a and 1979b) after protection with Boc_2O. Two singlet methyl signals were observed at δ 3.82 and 3.75 in the ^{1}H NMR spectrum. A hydroxyl group on C2' was acetylated

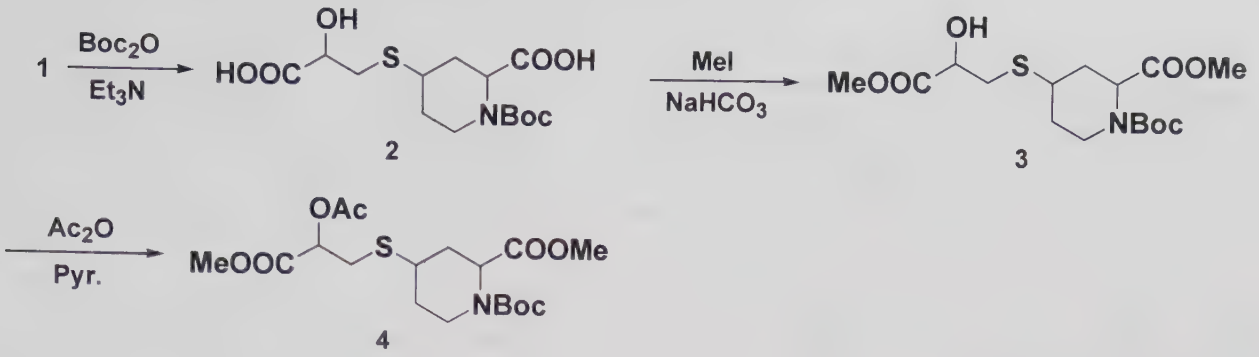


Fig. 6. Preparation of Boc derivative **2**, dimethyl ester derivative **3** and monoacetate **4**.

with Ac_2O pyridine, which was evident from deshielded proton signals (δ 5.21).

Ⅱ-3. Stereochemistry

The planar structure of Pul (**1**) was elucidated as 4-(2'-carboxy-2'-hydroxyethylthio)-2-piperidinecarboxylic acid (Section II-2). Pul has three asymmetric carbon, C2', C2, and C4. Therefore, it is thought that there are 8 steroisomers of 4-(2'-carboxy-2'-hydroxyethylthio)-2-piperidinecarboxylic acid.

In this section, the stereochemistry of Pul was determined by NOE experiments, chiral HPLC analysis and modified Mosher method.

Materials and Methods

Chiral HPLC analysis of pipecolinic acid

Pul (**1**, 2.0mg) was hydrogenolyzed at 60℃ in the presence of Raney Ni in H_2O for 2 days. The reaction mixture was then evaporated to dryness and dissolved in 5% aq MeCN containing 2mM $CuSO_4$. HPLC analysis was carried out with a Shimadzu SPD-10Avp equipped with UV-VIS detector on SUMICHIRAL OA-5000 (4.6×150㎜) with 5% aq MeCN containing 2mM $CuSO_4$ (detection, UV254nm ; flow rate, 1.0mℓ/min). Retention times : standard *L*-pipecolinic acid (4.667min), *D*-pipecolinic acid (6.650min) and product from **1** (7.300min). Absolute stereochemistry of pipecolinic acid obtained from **1** was assigned as *D*.

Preparation of dimethyl ester derivative, 3

A mixture of Pul (**1**, 2.4mg, 0.0096mmol) and HCl-MeOH reagent (1mℓ) was heated at 100℃ for 2 h. The mixture was evaporated to afford a dimethyl ester derivative **5** (2.9mg). The dimethyl ester derivative **5** was converted to TEA salt by treating with 0.4mℓ of TEA and 0.2mℓ of MeOH twice. The salt in0.5mℓ of TEA MeOH (1 : 1) was treated with $(Boc)_2O$ (3.27mg, 0.015 mmol). The mixture was warmed to 50℃ and stirred for 4 h, and the reaction mixture was evaporated to dryness. The residue was dissolved in hexane/EtOAc (1 : 1) and the solution was purified by column chromatography on silica gel (Wakogel C-300) with hexane/EtOAc (1 : 1) to afford a dimethyl ester **3** (1.8mg).

Preparation of (*R*)-and (*S*)-MTPA esters

(*R*)-and (*S*)-MTPA esters of **3** were prepared according to the reported procedures (Dale and Mosher, 1973). To a solution of **3** (0.9mg) in CH_2Cl_2 (300μℓ) and pyridine (300μℓ) was added (*R*)-(−)-or (*S*)-(+)-MTPA chloride (ca.10μℓ), and the solution was stirred at room temperature for 8 h. The reaction mixture was partitioned between CH_2Cl_2 and 10% $KHSO_4$. The organic phase was dried ($MgSO_4$) and purified by column chromatography on silica gel 60 (Katayama Kagaku, 70−230 mesh) with hexane/EtOAc (1 : 1) to afford a pure sample of the (*R*)-(1.0mg) or (*S*)-MTPA ester (0.5mg) of **3**.

Results and Discussion

The NOESY cross peaks observed between H4/H2 and H4/H6β and coupling constants indicated their axial orientation, while a W-coupling between H3β and H5β suggested their equatorial relationships. Therefore, the piperidine ring was in a

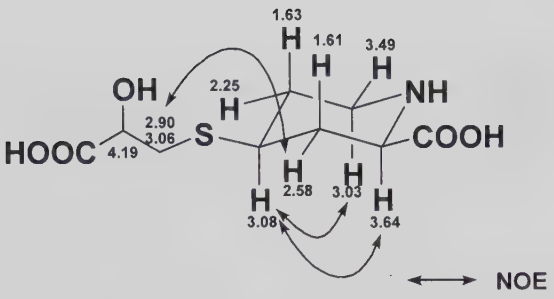


Fig. 7. A NOE correlations for **1**.

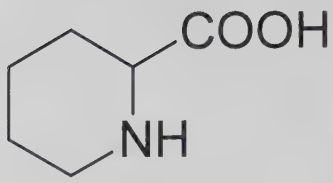


Fig. 8. A planar structure of pipecolinic acid.

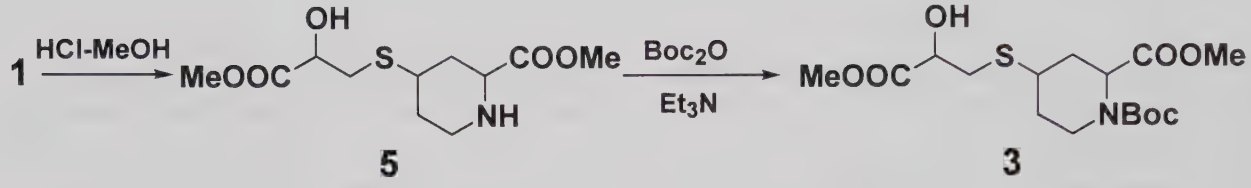


Fig. 9. Derivatization of dimethyl ester **5** with $(BOC)_2O$.

chair conformation having an ethylthio group on C4 and a carboxyl group on C2 as shown in **Fig. 7**. To determine the configuration of the C2 position, **1** was hydrogenolyzed on Raney Ni in H_2O at 60℃ to afford pipecolinic acid (**Fig. 8**). Chiral HPLC analysis disclosed that the stereochemistry of pipecolinic acid was *D*. The stereochemistry at the C2' position of **1** was determined to be *S* by the modified Mosher method (Dale and Mosher, 1973 ; Ohtani *et al.*, 1991 ; Kamiyama *et al.*, 1995 ; Shin-ya *et al.*, 1995) using the (*R*)-and (*S*)-ester of **3** (**Fig. 9**). Thus, H1'a and H1'b appeared at upper field in the (*R*)-ester than in the (*S*)-ester ($\Delta\delta$, +0.025ppm and +0.128ppm, respectively. $\Delta\delta = \delta_S - \delta_R$). While, $-OCH_3$ (at C3') appeared at upper field in the (*S*)-ester than in the (*R*)-ester ($\Delta\delta$, −0.042ppm). Accordingly, the absolute stereochemistry of **1** was 2'*S*, 2*R*, and 4*S*.

Chapter Ⅲ
Determination of pulcherrimine in the green sea urchin gonads

The preceding chapter describes isolation and structure elucidation of pulcherrimine (Pul), 4*S*-(2'-carboxy-2'*S*-hydroxyethylthio)-2*R*-piperidinecarboxylic acid from the mature ovaries of the green sea urchin. However, so far there is no determination method to inspect for this substance, other than a sensory test.

In the present study, to develop a method for determining the Pul content in the sea urchin gonads, dimethylaminoazobenzenesulphonyl chloride (Dabs-Cl) was used as a labeling reagent and satisfactory separation was obtained by HPLC (Lin and Chang, 1975 ; Chang *et al.*, 1981 and 1982). By this method, the Pul content in the gonads of the green sea urchin collected off Iwaki, Fukushima Prefecture in November 1998 was determined.

Ⅲ−1. Examination of a method for analysis

The preceding Chapter reports that Pul is a novel sulfur-containing amino acid and has an imino group in its structure. Many derivatization reagents for amino acids such as ninhydrin (Spackman *et al.*, 1958), *o*-phthalaldehyde (OPA) (Roth, 1971 ; Benson and Hare, 1975), dimethylaminoazobenzenesulphonyl chloride (Dabs-Cl) (Lin and Chang, 1975, Chang *et al.*, 1981 and 1982), dimethylaminonaphthalenesulfonyl chloride (Dansyl) (Bayer *et al.*, 1976), phenylisothiocyanate (PITC) (Muramoto *et al.*, 1978), fluorescein isothiocyanate (FIPC) (Muramoto *et al.*, 1984), etc., were examined for HPLC method. Ninhydrin and OPA are widely employed as a colorimetric reagent and a fluorometric reagent, respectively. However, the ninhydrin derivative of Pul was not spectrometrically sensitive enough and OPA did not react with an imino group. Dabs-Cl which is often used as a colorimetric reagent in HPLC analysis for imino

acids, amino acids and amines proved suitable for HPLC analysis because of its high sensitivity and the good separation of the Dabs-Cl derivatives (Lin and Chang, 1975 ; Chang *et al.*, 1981 and 1982).

In the present study, a method for analysis of Pul was examined, using Dabs-Cl as a labeling reagent.

Materials and Methods

Green sea urchin

The green sea urchins were collected off Iwaki, Fukushima Prefecture in November 1998. The sex of all individuals was readily identified from the oozed gametes (Fuji, 1960).

Sample preparation

Gonads from individuals were separately homogenized with an equal volume of distilled water, then the homogenate was heated at 100℃ for 12min. After being cooled, the homogenate was centrifuged at 1700× *g* for 10min. The precipitate was re-extracted twice with two volumes and an equal volume of distilled water in a similar manner as above. The extracts were combined in the volumetric flask and filled up to 10mℓ with distilled water.

Standard pulcherrimine

Pul as a standard was isolated from the mature ovaries of the green sea urchin by the same method as described in Chapter Ⅱ.

Reagents

Dabs-Cl was purchased from Tokyo Kasei Co. MeOH(HPLC Grade), EtOH(HPLC Grade), MeCN, AcOH and sodium bicarbonate were purchased from Wako Pure Chemical Co. Dabs-Cl solution was prepared by dissolving 1.3㎎ of Dabs-Cl in 2mℓ of MeCN, and this solution was kept in −20℃ until use.

Dabsylation of amino acids

Dabsylation was performed according to Lin and Chang (1975). Fifty micro liters of each specimen solution were dissolved in 100μℓ of 0.1M sodium bicarbonate (pH9.0). After 100μℓ of Dabs-Cl solution was added to each solution, the mixture was heated at 70℃ for 10min. Then the mixture was evaporated to dryness and subsequently the residue was dissolved in 2mℓ of 70% EtOH. The solution was filtered with a 0.5㎛ filter membrane (Millipore, Samprep-LCR). Twenty micro liters of the filtrate was injected to the HPLC apparatus.

HPLC analysis

HPLC analysis was performed with a Shimadzu LC-10AT liquid chromatograph equipped with a SPD-10A, UV-VIS detector and a FCV-10 AL gradient unit. A HPLC column, YMC pack ODS column, 250㎜×4.6㎜ i.d. was used. As the mobile phase, 40% aq MeOH containing 1% AcOH (A) and MeOH containing 1% AcOH were used. The gradient was 100% to 40% A in 72min linearly and 40% to 0% A from 72 to 75min, and kept to 0% A between 75 and 90min. Flow rate was adjusted at 0.8mℓ/min and column temperature was kept at 25℃. The absorbance was monitored at 436nm.

Results and Discussion

Chromatograms of a Dabs-Pul standard, a dabsylate of extract from the ovary and that from a testis are shown in **Fig. 10**. Pul was found to be dabsylated similarly to ordinary amino acids. The dabsylated standard Pul appeared at the retention time of 64.8min. The other peaks on this chromatogram were considered to be those of by-products derived from the reagents used as mentioned in the previous papers (Lin and Chang, 1975 ; Chang *et al.*, 1981 and 1982). Dabs-Pul (retention time of 64.5min) was satisfactory separated from the other dabsylated amino acids extracted from the ovary in the present gradient system. No peak corresponding to Dabs-Pul appeared in the chromatograms for the extract of testis. Chang *et al.* (1982) have developed a complete separation HPLC system for 21 Dabs-amino acids using phosphate buffer containing dimethylformamide (DMF) and acetonitrile containing DMF as gradient solvents. Since the purpose of this study was only to determine Pul, the separation is useful if only Dabs-Pul can be separated from other dabsyl-amino acids. In this sense, a satisfactory separation of

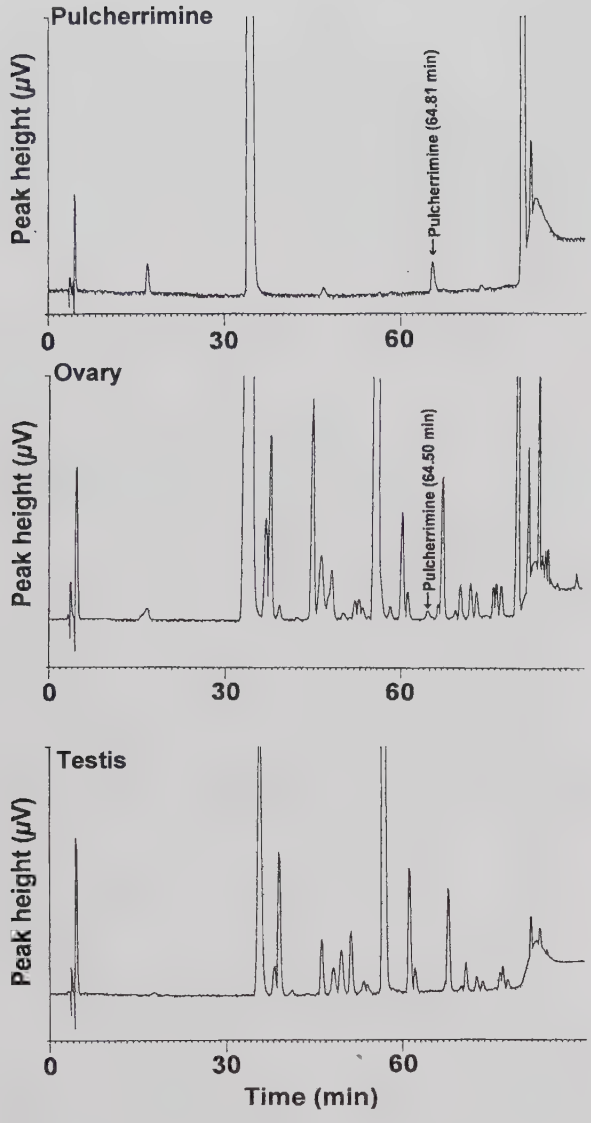


Fig. 10. HPLC chromatograms of a Dabsyl-pulcherrimine standard, a dabsylate of extract from an ovary and from a testis.
The HPLC column : YMC pack ODS column, 250㎜×4.6㎜ i.d. Mobile phase : A, 40%MeOH containing 1%AcOH ; B, MeOH containing 1% AcOH. The gradient was 100%A to 40%A in 72 min, 40%A to 0%A from 72 to 75min, kept at 0%A between 75 and 90min. Flow rate was 0.8mℓ/min and column temperature was 25℃. The absorbance detection wavelength was 436nm.

Dabs-Pul was performed by the gradient system described in the part of Materials and Methods.

To determine a calibration curve, standard Pul solutions of concentrations ranged from 0μg/mℓ to 4μg/mℓ were used. As shown in **Fig. 11**, a linear correlation ($r=0.994$) was obtained between the Pul concentration (X) and the peak area (Y). This calibration curve was used for the determination of the Pul content of the sea urchin gonads.

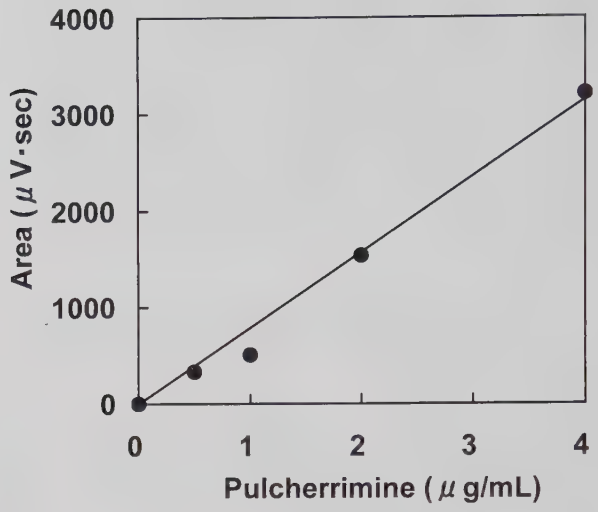


Fig. 11. Calibration curve for pulcherrimine.
$Y=779.7X$ ($r=0.994$), where X is the pulcherrimine concentration and Y is the peak area.

Table 5. Percent recovery of pulcherrimine standards from gonads

	Blank (㎎/100 g)	Amount added (㎎ 100 g)	Amoumt found (㎎ 100 g)	Recovery (%)
Testes		1.46	1.14	78.1
		1.46	1.47	100.7
		1.46	1.32	90.4
		4.86	4.35	89.5
		4.86	4.51	92.8
		4.86	4.71	93.8
Mean ± SD				91.4 ± 7.7
Ovaries	2.04	0.65	2.61	88.0
	1.39	0.65	2.02	96.9
	0.43	0.65	0.95	80.0
	1.00	1.30	2.03	79.2
	1.00	1.30	2.08	83.1
	0.43	1.30	1.64	93.1
Mean ± SD				86.7 ± 7.2

† Percent recovery = (amount found-blank) amount added × 100.

The recovery of this method was tested by adding different amounts of Pul ranging from 0.65 to 4.86㎎/100 g to a sea urchin ovary or testis (spiked samples). The spiked samples were extracted and analyzed in the same manner as mention above. **Table 5** shows the recovery of Pul by this dabsylation-HPLC method. The percent recovery ranged from 86.7% to 91.4%. No significant differences in the recoveries were observed between the ovaries and testes.

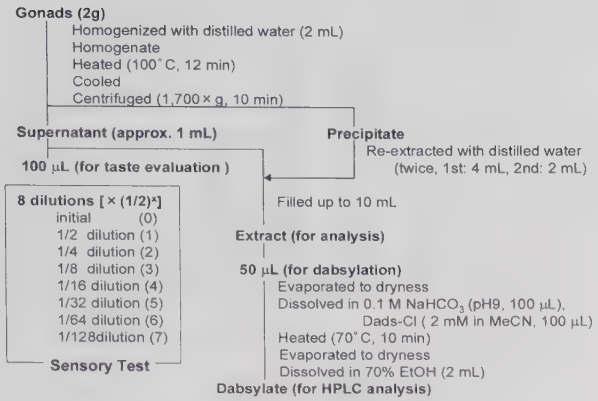


Fig. 12. Sample preparation for HPLC analysis and sensory test.

Ⅲ－2. Correlation between bitterness and content

In the preceding section, an analytical method for Pul using Dabs-Cl was developed. The present section describes determinetion of the Pul content in ovaries and testes of green sea urchins collected at the sea off Iwaki in November 1998 and correlation between bitterness and Pul content.

Materials and Methods

Green sea urchin

The green sea urchins were collected off Iwaki, Fukushima Prefecture in November 1998. The sex of all individuals was readily identified from the oozed gametes (Fuji, 1960).

Sample preparation

Gonads from individuals were separately homogenized with an equal volume of distilled water, then the homogenate was heated at 100℃ for 12min. After being cooled, the homogenate was centrifuged at 1700× g for 10min. One hundred micro liters of the supernatant were used for taste evaluation and the remainder was transferred to a volumetric flask (10mℓ or 20mℓ). The influence of using 100 μℓ of the supernatant on the analysis of Pul content was calculated to be less than 1.25% and was regarded as negligible. The precipitate was re-extracted twice with two volumes and an equal volume of distilled water in a similar manner as above. The extracts were combined in the volumetric flask and filled up with distilled water (**Fig. 12**).

Dabsylation of amino acids and HPLC analysis

Dabsylation of amino acids and HPLC analysis were carried out by the same method as described in the preceding section.

Sensory test

The concentration ranges of extracts for evaluations included eight dilutions from 1 (initial) to 1/128 of dilution which decreased by a factor of 2 and the initial concentration was the original extract. These eight concentration ranges were converted into eight scales of bitterness. Scales of bitterness were as follows ; 0 (initial), 1 (1/2 of dilution), 2 (1/4 of dilution), 3 (1/8 of dilution), 4 (1/16 of dilution), 5 (1/32 of dilution), 6 (1/64 of dilution), 7 (1/128 of dilution). Evaluation was started with the weakest concentration and performed from a weaker to a stronger. The bitterness was defined as the mean value of the scale being converted from the lowest concentration at which the bitterness can be recognized by five subjects.

Results and Discussion

Figure 13 shows the Pul content analyzed for the gonads of 40 sea urchin individuals. Pul content in ovaries ranged from a minimum value of 0.04 to a maximum value of 2.3mg/100g, and the average was 1.37±0.54mg/100g (n=20). On the other hand no Pul was detected in any of the testes examined (n=20). **Figure 14** shows the rela-

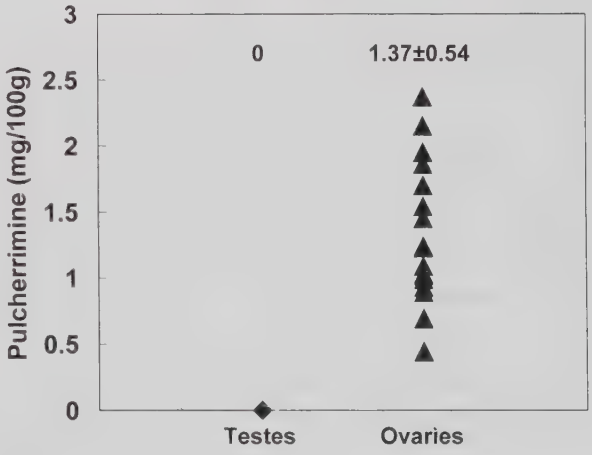


Fig. 13. Pulcherrimine content of testes and ovaries of the green sea urchin. The data were obtained from 20 individuals of each sex.

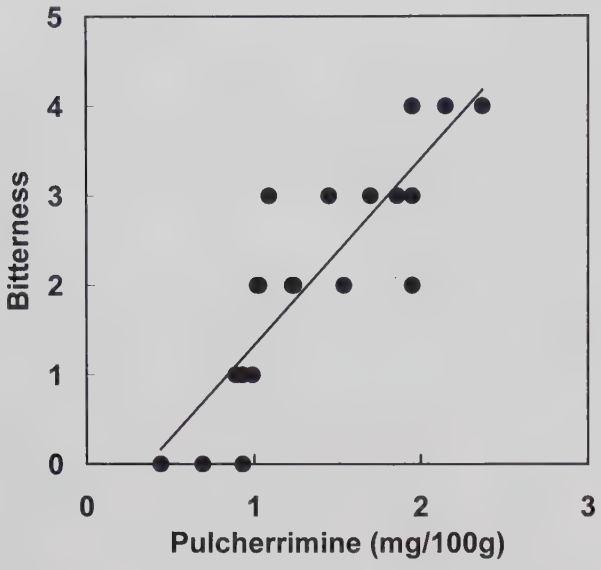


Fig. 14. Correlation between bitterness (B) and pulcherrimine content (p).
$B = 2.08p - 0.75$ ($r = 0.860$, $n = 20$, $P < 0.0001$).

tionship of bitterness (B) with the Pul content (p) of the 20 individuals analyzed. A linear correlation was discerned between them. The relation can be expressed as an equation:
$B = 2.08p - 0.75$ [$r = 0.860$, $n = 20$ ($P < 0.0001$)].

As to ovary, Pul concentrations obtained were in good agreement with the intensity of bitterness of the sea urchin ovary. On the other hand, no Pul was detected in all the testes examined, and no testis was bitter. These findings indicate that Pul distributes in mature ovaries, but not in mature testes, and that Pul is a bitter component characteristic of the green sea urchin ovaries.

Ⅲ－3. Seasonal changes in content

The previous section (Section Ⅰ-2) described the result of the tri-monthly examinations in relation to the seasonal changes in the maturity and the frequency of occurrence of bitter gonads of the green sea urchin inhabit in the sea off Iwaki. Accordingly, the seasonal changes in the frequency of bitter ovaries agreed with that in the distribution of mature ovaries.

In the present study, the Pul content of the tri-monthly samples between November 1998 and November 1999 (see Section Ⅰ-2) was determined.

Materials and Methods

Green sea urchin and sample preparation

The tri-monthly samples were the same samples of the green sea urchin described in Section Ⅰ-2. Sample preparation was also the same manner as Section Ⅰ-2.

Dabsylation of amino acids and HPLC analysis

Dabsylation of amino acids and HPLC analysis were carried out by the same method as described in Section Ⅲ-1.

Results

Twenty specimens were randomly selected from each of mature ovaries and testes and analyzed for Pul content in each month. No Pul was detected in mature testes and they had no bitter taste.

Figure 15 shows histograms representing the distribution of Pul content among the mature female individuals in each month. Pul content distributions had large variances in all months examined and were different among months. Many individuals with Pul levels more than 0.5mg/100 g were found in November 1998, February 1999 and November 1999. Histograms of February 1999 and November 1999 showed that the mean of Pul content (1.59 and 0.93mg/100 g) was located within the mode column. Also in Nov 1998, the mean Pul content (1.37mg 100g) located near the mode. Being in contrast, in May and Aug 1999, the mode of each Pul level was at the lowest column, and many mature ovaries with no Pul were found. The distributions were highly skewed for these two months. Some of the non bitter ovaries have been found to have Pul, whose content was less than 0.5mg/100 g.

Discussion

Pul content distributions of mature ovaries had a large variance in every month and were different among months. Pul levels of mature ovaries were the highest in February, and those of mature ovaries in November 1998 were relatively high. In November 1999, most of the mature ovaries analyzed had more than 0.5mg/100 g of Pul. On the other hand, in May and August 1999, Pul levels of

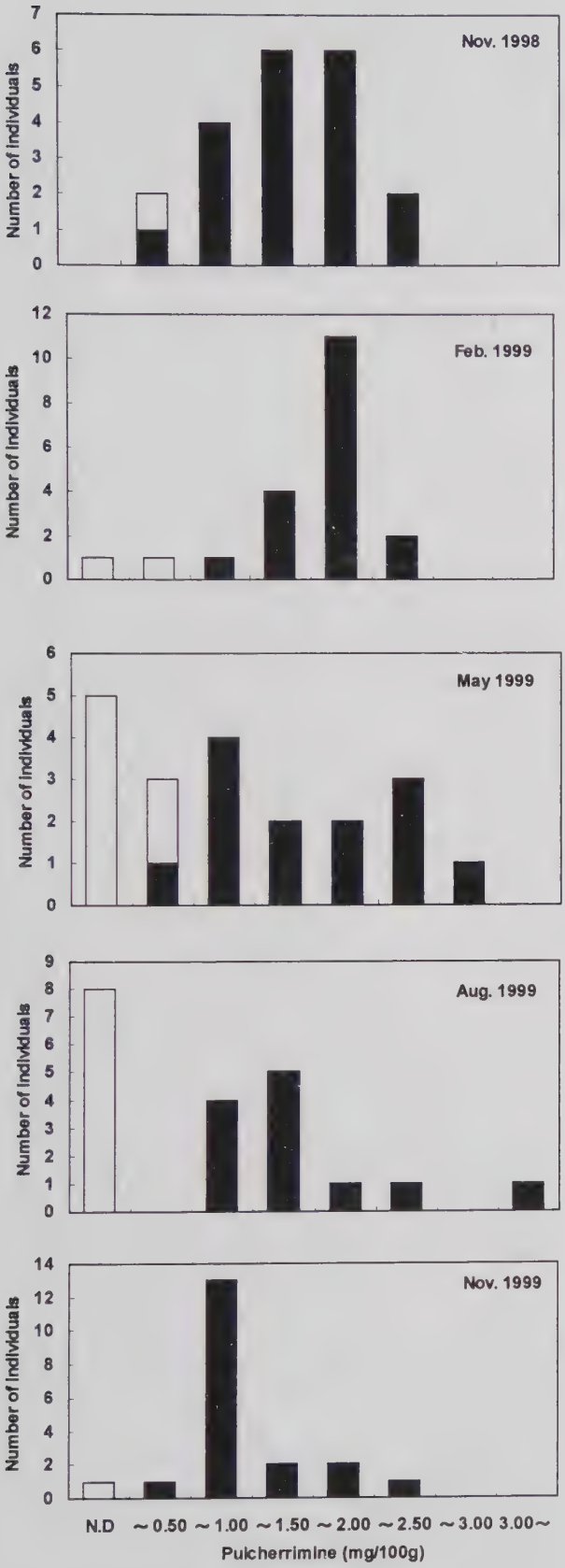


Fig. 15. Frequency distribution of pulcherrimine contents among mature female individuals in each season. Open and/or solid areas in a bar, indicate non bitter ovaries and bitter ovaries, respectively. N. D. means that pulcherrimine was not detected.

mature ovaries were relatively low and many non Pul-containing ovaries were found. These results suggest that the amount of Pul is related to the seasonal change of the green sea urchin ovaries.

Analysis of each 20 mature testes in every month showed that Pul was not detected in mature testes. These results are consistent with the preceding Section.

Non Pul containing gonads had no bitter taste. On the other hand, less than 0.5mg/100 g of Pul was occasionally detected in non bitter gonads. It is probable that the Pul content was lower than its taste threshold level in these gonads.

Chapter Ⅳ
Sensory tests for pulcherrimine

Most naturally occurring amino acids are considered to have a characteristic taste, and some of them are, of course, important as taste active components in food. Therefore, there are many papers dealing with the taste of amino acids. Solms *et al.* (1969) examined aqueous solutions of *L*-amino acids (ordinary amino acids) and the corresponding *D*-form amino acids adjusted to pH 6.0 for their respective tastes, and described that amino acids could be classified into three groups according to their taste qualities. Group 1 consists of amino acids which have no taste at all, or only a barely perceptible taste. Group 2 consists of amino acids with complex taste sensations, which are difficult to evaluate in the pure state. Group 3 comprises of amino acids with distinctive tastes, either bitter or sweet, which were compared quantitatively with caffeine and sucrose solutions, respectively (Solms *et al.*, 1969). Schiffman *et al.* (1976) compiled a list of the taste qualities of amino acids from a number of reports ; subsequently, they made a comparison of the taste qualities, and compared the threshold of the taste between corresponding *D*-and *L*-enantiomers (Schiffman *et al.*, 1981). Yoshida *et al.* (1969) performed a multidimensional scaling analysis of the taste of amino acids.

As mentioned in Chapter Ⅱ, pulcherrimine (Pul) was isolated as the substance responsible for the bitter taste to gonads of the green sea urchin, and identified as a novel amino acid. This new amino acid was considered to be classified into the group 3 of Solms' classification (Solms *et al.*, 1969).

Therefore, the threshold of this amino acid is of basic importance for the study of the true situation of the occurrence of the bitter green sea urchins, and for studies on the bitter amino acid from the view point of food science.

The present Chapter describes the determination of the threshold values for the detection of and for recognition of Pul. Firstly, the thresholds for Pul in aqueous solution were determined. Secondly, the thresholds, when pulcherrimine is present in an extract of green sea urchin gonads.

Ⅳ－1. Detection and recognition thresholds

The threshold for taste active components is generally divided into two categories : the detection threshold and the recognition threshold. The detection threshold is defined as the lowest concentration at which the taste can just be detected, while the recognition threshold is defined as the lowest concentration at which the quality of the taste stimulus can be recognized. The threshold is a statistical concept : a threshold value usually refers to the concentration that is detected or recognized 50% of the time (Bartoshuk, 1978). Schiffman (1981) described the taste qualities and the detection thresholds for 42 kinds of amino acids of *L*-and *D*-forms. In the present study, the detection threshold and the recognition threshold for Pul were estimated using a triangle test, which is one of the methods for sensory evaluation of the taste.

Materials and Methods

Subjects

The subjects were 7 males and 3 females from the National Research Institute of Fisheries Science. Their age ranged 20－40 years old.

Stimuli

Pul was isolated from mature green sea urchin ovaries using the same method as described in Chapter II. A series of diluted solutions of Pul ranging from 0.031 to 2mM was prepared using distilled water.

Procedure

A sensory test was carried out using a triangle test (Schiffman *et al.*, 1981) in which the lick method (Yamaguchi *et al.*, 1994) was incorporated. For this test, 0.1mℓ of each solution was placed on a small plastic spoon using a micropipet and the subjects were asked to lick the solutions carefully and judge the taste. Both the detection and recognition thresholds for Pul were determined by trials which began with the weakest concentration and proceeded to progressively stronger concentrations. At each trial, the subjects were presented with a tray on which three unmarked spoons were placed, one of which contained the Pul dilution, and the other two of which contained only distilled water. After tasting the liquids on each of the three spoons, the subjects judged which spoon contained the stimulus (detection threshold), or which spoon contained the bitter substance (recognition threshold). Percentages of correct judgements for each concentration were plotted and the 50% level of positive responses was defined as the detection or recognition thresholds (Patton and Josephson, 1957). For comparison, both the detection threshold and recognition threshold of quinine sulfate were examined by exactly the same method.

Results

The detection threshold and recognition threshold levels for Pul were determined by tasting seven aqueous solutions differing in the Pul concentration. All the subjects perceived equally the bitterness of Pul, however, the degree of response differed somewhat among individuals. The rates of correct answer for each Pul concentration were plotted as shown in **Fig. 16** (Patton and Josephson, 1957 ;

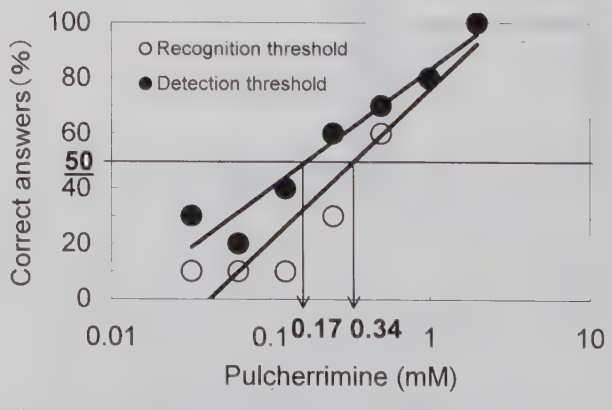


Fig. 16. Taste threshold data for pulcherrimine using ten taste panelists.

Bartoshuk, 1978). The detection threshold and the recognition threshold were estimated as 0.17mM and 0.34mM, respectively, based on this plot. As a reference examination, the detection threshold and recognition threshold for quinine sulfate were estimated to be 0.005mM and 0.019mM, respectively.

Discussion

The experimental data indicates that the detection threshold for Pul is forty times higher than that of quinine sulfate, which is one of the most typical bitter substances (Pfaffmann *et al.*, 1971). By way of comparison of the detection threshold of Pul with values reported for amino acids by Shiffmann *et al.* (1981), the detection threshold of Pul is approximately the same as that of *L*-aspartic acid (threshold : 0.182mM) which exhibits a slightly bitter taste. By comparison with *L*-Val (4.16mM), *L*-Leu (6.45mM) and *L*-Ile (7.41mM) which are known as bitter substances in sea urchin gonads (Komata 1964), the detection thresholds for Pul is as small as 1/40 to 1/20 of those such amino acids. When compared with *L*-threonine which has a slightly bitter taste, the threshold for Pul is as small as 1/100 of that of threonine.

In this study, the lick method was employed using 0.1mℓ of test solutions. Yamaguchi and Kobori (1994) described that the detection and recognition thresholds for quinine sulfate by the lick method with 0.01mM of the solution were higher than those determined by the whole mouth method with10mM of the solution. However, in the case of Pul, the lick simulation with 0.1mℓ of test solutions, which was employed in this study, seemed to be a more convenient method than the whole mouth simulation, in view of the facts that Pul tends to leave an aftertaste and these was a restriction on the amount of Pul that could be readily prepared.

Ⅳ－2. Thresholds in the extracts from sea urchin gonads

In the preceding Section, the detection and recognition thresholds for Pul were estimated using a triangle test to be 0.17mM and 0.34mM, respectively. In many cases, the taste of an individual amino acid is complex, and threfore cannot be represented by a single quality dimension such as bitter (Schiffman 1976). Ninomiya *et al.* (1965, 1966) demonstrated the component taste profiles of amino acids. For example, the taste of Val was represented as a component profiles as sweetness (23.4%), saltiness (0%), sourness (2.2%), bitterness (72.0%) and umami (1.4%). The taste characteristics of each amino acid are greatly influenced by the concentration of their solution, pH and other coexisting substances such as inhibitors and enhancers, etc. Therefore, it must be taken into consideration that some kinds of components extracted from the sea urchin gonads might influence the taste qualities. In the preceding Chapter, it was observed that the Pul content and the degree of the bitterness of mature ovaries (extracts) were significantly correlated to each other.

In the present study, it was examined whether or not the detection and recognition thresholds for Pul are effected by the extractive substances using extracts of mature ovaries, testes, and immature gonads of green sea urchin.

Materials and Methods

Subjects and pulcherrimine

The subjects and pulcherrimine as the specimen are the same as those in the preceding section.

Green sea urchin

Green sea urchins were collected from the coastal sea off Iwaki, Fukushima Prefecture (Fukushima sea urchin) in August 1999 and from the coastal sea off Mikuni, Fukui Prefecture (Fukui sea urchin) in August 2000. The former sea urchins were mature, and sex was readily discernible.

Similarly to that mentioned in the preceding Chapter, Pul was detected in most of the mature female individuals collected from the sea off Iwaki, however, in May and August 2000, many female individuals, in which no Pul was detected were found. Such female individuals were used for the examination in this experiment. On the other hand, sea urchins collected from the sea off Fukui were immature and therefore all the gonads for examinations contained no Pul. The gonads of each

Table 6. Detection and recognition thresholds for pulcherrimine in the extracts of the sea urchin gonads determined by a triangle test

Concentration (mM)	Immature gonads[†1]		Ovaries[†2]		Testes[†3]	
	Detection threshold Correct answers (%)	Recognition threshold Correct answers (%)	Detection threshold Correct answers (%)	Recognition threshold Correct answers (%)	Detection threshold Correct answers (%)	Recognition threshold Correct answers (%)
0.032	10	0	30	0	10	10
0.063	30	20	30	20	20	10
0.125	40	30	30	20	40	20
0.25	40	30	50	30	40	20
0.5	50	40	60	40	60	50
1	90[†5]	70[†3]	80[†4]	80[†4]	80[†4]	80[†4]
Threshold (mM)[†]	0.25	0.52	0.22	0.46	0.27	0.46

[†1]Sea urchin sampled from the sea off Mikuni in Fukui Prefecture.
[†2]Sea urchin sampled from the sea off Iwaki in Fukushima Prefecture.
[†] The concentration at which the 50% level of the rate of correct answers was obtained.
[†3]Binominal test, $P<0.05$, [†4]$P<0.01$, [†5]$P<0.001$

sea urchin (male, female, immature) were dissected out and subjected to the extraction with water.

Preparation of test solutions

Nine grams each of male, female and immature gonads were homogenized with 5mℓ of distilled water, and the homogenate obtained was heated in boiling water for 12min. After being cooled, the homogenate was centrifuged at 1700× *g* for 10min. The supernatant was transferred to a volumetric cylinder (50mℓ) and the residue was re-extracted twice with 10mℓ of distilled water in the same manner as above. The extracts were combined in the volumetric cylinder and filled up to 27mℓ with distilled water. The extract was divided into two parts : a test solution (9mℓ) and a control solution (18mℓ). A series of 6 test solutions were prepared by adding Pul to the solution in a range of concentrations of 0.031 to 1mM. To adding the extracts of test solutions and that of control solutions, to be equal to each other as for the concentration of extractive substances in them, the ratio of each extracts to the Pul solution was set to 9 : 1.

Sensory test and analysis of the data

The procedure of sensory tests and statistical analysis of the data were the same as described in the preceding Section (Ⅳ-1).

Results

The detection threshold and recognition threshold for Pul added to the extracts of the green sea urchin gonads were estimated to be 0.25mM and 0.52mM in the case of the immature gonad extract ; 0.22mM and 0.46mM in case of the mature ovary extract ; and 0.27mM and 0.46mM in case of mature testes extracts (**Table 6**). That is to say, the bitterness of Pul in the gonad extracts was perceived by subjects, regardless of sex and/or the maturity of the sea urchin as far as examined. However, both of the detection and recognition thresholds in each extracts were twice higher than the thresholds observed for distilled water.

Discussion

Both of the thresholds for Pul when present in each gonad extract, were higher than those for Pul in distilled water. Many of the subject pointed out that the extracts had a kind of thick taste, and the bitterness of Pul in the extracts was felt to be somewhat vague. The method of Komata (1969) was employed to prepare the extracts in this study. Though the method of Komata (1969) was employed in this study, the ethanol treatment of the extract to remove high-molecular-weight compounds (HMWC) was omitted, because it was found that the ethanol treatment caused the

pH to decline and affected the taste quality of the extracts (Murata and Sakaguchi, 1990). The extracts examined might contain various HMWC, glycogen and protein, etc. Glycogen which is contained at a relatively high concentration in green sea urchin gonads shows a distinct body effect by smoothing the taste of the extract (Komata, 1969).

Proteins in the extract of sea bream muscle are said to give any additional body to the taste, and gelatin has a masking effect on bitterness. In considering these facts, the extracts examined which contain a large amount of HMWC must musk the bitter taste in some extent. Ming *et al.* (1999) reported that AMP inhibited behavioral and electrophysiological responses of mice to bitter tastants. As to the effect of HMWC and extractive components on the taste of the extracts of the sea urchin gonads, further study is necessary.

Chapter V
Behavioral responses to pulcherrimine using the CTA paradigm in C57BL/6 and BALB/c mice

Many behavioral studies in mice have been made to clarify possible genetic bases for receptor sensitivities to various taste stimuli. By measuring behavioral preference and aversion thresholds with a two bottle test, prominent strain differences in mice have been found in the taste thresholds to many bitter (Lush, 1981, 1982, 1984), sweet (Fuller, 1974; Lush, 1989) and umami (Bachmanov *et al.*, 2000) substances, and subsequent genetic analysis on the strain differences in some of bitter sensitivities has been made successfully. Sucrose octaacetate (SOA), is one of such bitter substances whose sensitivities have genetically been analyzed in mice (Ninomiya *et al.*, 1993 and 1999). Warren and Lewis (1979) found that only CFW/NIH mice show a strong aversion to 10^{-3} to 10^{-6}M SOA among 5 inbred strains tested. Their genetic analysis indicates that the strain difference is determined by a single autosomal gene wit the 'taster' allele dominant. Lush (1981) reported that SWR is the only strain to show an aversion to drinking SOA for 31 inbred strains. Genetic analysis using a crossbred strain SWR/Lac (taster) and LVC (nontaster), and the 31 inbred strains, suggested that the gene *Soa* determines the ability of a mouse to taste SOA. Further behavioral and genetic studies suggest that sensitivities to quinine (Qui), raffinose undecaacetate (RUA), copper (Ⅱ) glycinate (GLB) and cycloheximide (CYX) are controlled by the single genes *Qui*, *Rua*, *Glb* and *Cyx*, which are located on the mouse chromosome 6 (Lush, 1991; Lush *et al.*, 1995). These genes are thought to differentially control receptor mechanisms for each different bitter substance (Lush *et al.*, 1995).

The preceding chapter reported that pulcherrimine (Pul) taste bitter to humans with a detection threshold of 0.17mM, but not examine receptor mechanisms for Pul. If there are many receptors for bitter substances as speculated in the abovementioned and recent molecular genetic mouse studies (Chandrashekar *et al.*, 2000), it is possible that receptor mechanism for Pul would differ from those for other bitter compounds. As shown in previous mouse studies, possible differences in receptor mechanisms among bitter substances may appear in strain differences in their behavioral thresholds and qualitative discriminabilities among bitter substances. In order to examine this possibility, in this Chapter the author compared behavioral responses to Pul in C57BL and BALB mice.

To measure both quantitative and qualitative responses to pulcherrimine the author employed the conditioned taste aversion (CTA) paradigm whose method logical basis is described as follows. When animals feel internal malaise after ingestion, they learn the taste or smell of that food, and avoid it in future. CTA applies such behavior in animal experiments. García introduced the CTA paradigm into the laboratory (García *et al.*, 1955) and this technique is now used in many physiological studies (Bures *et al.*, 1998). An intraperitoneal injection of LiCl is most widely used as unconditioned stimulus (US) for CTA experiments.

An animal is injected with LiCl, which elicits internal malaise or nausea after feeding the solution for conditioned stimulus (CS). Then animals learn the CS-US association and avoid the CS (Nachman, 1963; Archer and Sjoden, 1979). In this study, the number of licks per 10s were counted to examine the strength of the CTA to each stimulus.

V－1. Behavioral thresholds in C57BL/6 and BALB/c mice

In this section, to examine the difference of sensitivity to Pul between C57BL/6 and BALB/c strains, behavioral thresholds for Pul were estimated using the CTA paradigm.

Materials and Methods

Subjects and stimuli

Subjects were adult male and female mice of the C57BL/6 and BALB/c strains weighing 20－30 g. Three mice were housed together in a cage and received *ad libitum* food and water until the start of the experiments. Cages were placed in a light-, temperature-and humidity-controlled room.

The conditioning stimulus (CS) was 4mM Pul and the test stimuli (TSs) were 0.03－4mM Pul.

Procedures

The present behavioral experiment was carried out according to the method described by Ninomiya *et al.* (1994). On the first day of training, each animal was placed in a test box and given free access to distilled water during a 1h session from a single drinking tube via a circular window (5㎜ in diameter). The tip of a polyethylene tube (1.5㎜ inner diameter) was located 2.0㎜ outside the window. This arrangement prevented contact of the tip of the tube with the animal's lips. Licks were detected by a lickometer with a photo lick sensor and recorded on a digital recorder. From the second to the fifth day, the training session time was reduced from 1h to 30min. During this period, the animal was trained to drink distilled water on an interval schedule, consisting of 10sec periods of presentation of the distilled water alternated with 20sec inter-trial intervals, resulting in 30－50 trials during the 30min session. On the sixth day, each animal was given access to 4mM Pul during the interval schedule for more than 20 trials, and then given an intraperitoneal injection of LiCl (230mg/kg) to induce gastrointestinal malaise.

The control mice drank distilled water before the LiCl injection. The seventh day was a recovery period, but the training of drinking distilled water for 30min was still carried out on this day. On the eighth, ninth and tenth days, the number of licks for each 0.03－4mM Pul solution and distilled water given by each animal was counted during the first 10sec after the animal's first lick. On each test day, the first test stimulus given to the animal was distilled water. Then Pul solutions of 6 different concentrations were then tested in a descending order. The mean number of licks across the three test days was obtained in each mouse.

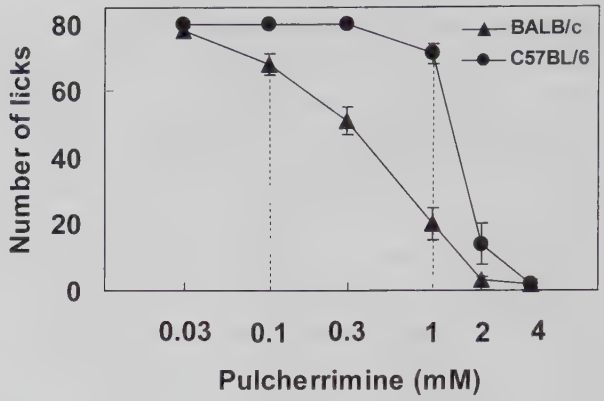


Fig. 17. The number of licks per 10s (mean ± SE, $n = 5－8$) for 0.03－4mM pulcherrimine after aversions were conditioned in mice to 4 mM pulcherrimine. Each dotted line indicates the aversion threshold for pulcherrimine.

Data analysis

The aversion threshold for Pul in each animal was determined as the concentration at which the number of licks per 10sec was significantly lower than that for distilled water (t-test, $P < 0.05$).

Results and Discussion

Figure 17 shows the number of licks per 10sec (mean ± SE) for distilled water and Pul at 6 different concentrations obtained from the C57BL/6 and BALB/c strains after aversions were conditioned in the mice to 4mM Pul. The aversion threshold for Pul, at which the number of licks was significantly lower than that for distilled water, was 1mM in C57BL/6mice, while it was 0.1mM in BALB/c mice. This fact suggests that the taste sensitivity to Pul is higher in BALB/c than in C57 BL/ 6 mice.

In the preceding Chapter, the human detection threshold for Pul was described to be 0.17mM. Therefore, the threshold value for Pul in C57BL/6 mice is 5.9 times higher, while that in BALB/c mice is 0.6 times higher than human taste threshold. In ddy mice, the behavioral thresholds for

most of amino acids using the two bottle tests was reported to be higher than the human detection threshold by 3－8 times (Kasahara *et al.*, 1987). These discrepancy may be due to the fact that the behavioral threshold is not a direct measure of the recognition threshold, because in mice the neural response thresholds for amino acids, which may be considered as the detection thresholds, were found to be somewhat lower than the behavioral thresholds (Iwasaki *et al.*, 1985).

V－2. Behavioral responses using the CTA paradigm in C57BL 6 and BALB/c mice

Taste effectiveness and qualitative discrimination of amino acids have been behaviorally examined in mice (Ninomiya *et al.*, 1984 ; Kasahara *et al.*, 1987 ; Ninomiya and Funakoshi, 1989) and rats (Pritchard and Scott, 1982) by using the CTA paradigm.

Pul tastes bitter to humans like quinine hydrochloride, valine, brucine, etc. It is thought that many receptor mechanisms contribute to the bitter taste sensitivity. While humans can not discriminate the quality of bitter stimuli as well as mice.

In order to investigate the qualitative similarities and differences between Pul and other taste stimuli, the generalization patterns of a CTA to various compounds were compared between C57BL 6 and BALB/c mice.

Materials and Methods

Subjects and stimuli

The strains of mice were described in the preceding section. Each animal was conditioned to avoid one of 15 compounds and distilled water, forming 15 experimental groups and one control group with 4－6 mice from each strain for each stimuli. Three or four animals in each group were housed together and maintained on *ad libitum* food, but given access to distilled water during the training and testing sessions.

The CS for each of the 15 experimental groups was one of the following ; 4mM Pul, 4 sulfur-containing bitter substances [1mM 6-*n*-propylthiouracil (PROP), 1mM phenylthiourea (PTC), 0.03M $MgSO_4$, 0.01mM quinine sulfate (QH_2SO)], 5 non sulfur-containing bitter substances [1mM sucrose octaacetate (SOA), 0.1mM denatonium benzoate (Den), 0.03mM quinine hydrochloride (Qui), 0.03mM strychnine (Str), 0.1mM brucine (Bru)], a bitter amino acid [0.1M *L*-valine (Val)], a sulfur-containing amino acid [0.1M *L*-methionine (Met)], the four basic tastes [0.3M sucrose (Suc), 10mM HCl, 0.1M NaCl, 0.1M MSG]. The CS for the control group was distilled water. These solutions were also used as TSs. The 6 bitter amino acids [0.1M *L*-leucine (Leu), 0.1M *L*-isoleucine (Ile), 0.1M *L*-phenylalanine (Phe), 0.1M *L*-arginine (Arg), 0.1M *L*-lysine hydrochloride (LysHCl), 0.03M *L*-tryptophan (Trp)] were used as TSs.

Procedures

The procedure of the training, CTA and testing was the same as in the preceding section. In this experiment, the number of licks for each of 16 TSs including the CS and distilled water given by each animal was counted during the first 10s after the animal's first lick.

Data analysis

The strength of the CTA to each stimulus was expressed as a percent suppression according to the formula :

$$\%\text{suppression} = [1 - (\text{licks/10sec of experimental group}) / (\text{licks/10sec of control group})] \times 100.$$

Cluster analysis was performed with the statistical package SPSS for Windows, version 10.0J. Intercluster similarity was measured using the Pearson's correlation and cluster analysis was performed according to the single linkage method.

Results

CTA generalization pattern

Figure 18 shows the patterns of suppression of licking across 21 TSs after aversion was conditioned in the C57BL/6 (A) and BALB/c (B) mice to Pul. The solid columns indicate that the number of licks after conditioning was significantly smaller than that in the control animals (*t*-test, $P < 0.05$). Percent suppression for the CS of Pul in the two strains of mice was more than 90%, indicating that the CS was almost equally effective cues. Pul generalized significantly (*t*-test, $P < 0.05$)

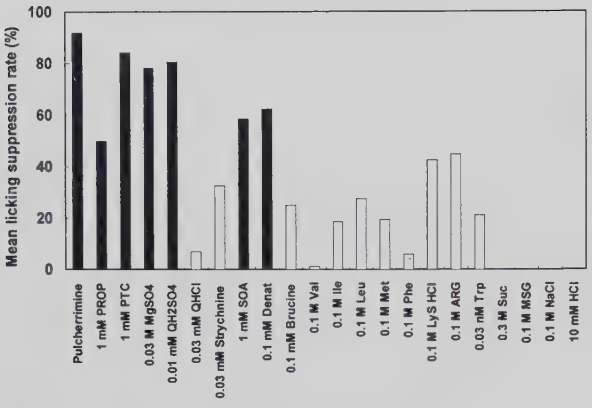


Fig. 18(A). Patterns of suppression of licking across 22 test stimuli after aversion was conditioned in C57BL/6 mice to 4mM pulcherrimine. ■ : significantly suppressed after CTA.

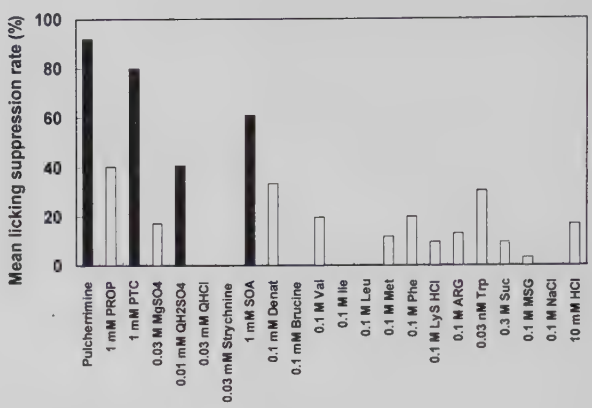


Fig. 18(B). Patterns of suppression of licking across 22 test stimuli after aversion was conditioned in BALB/c mice to 4mM pulcherrimine. ■ : significantly suppressed after CTA.

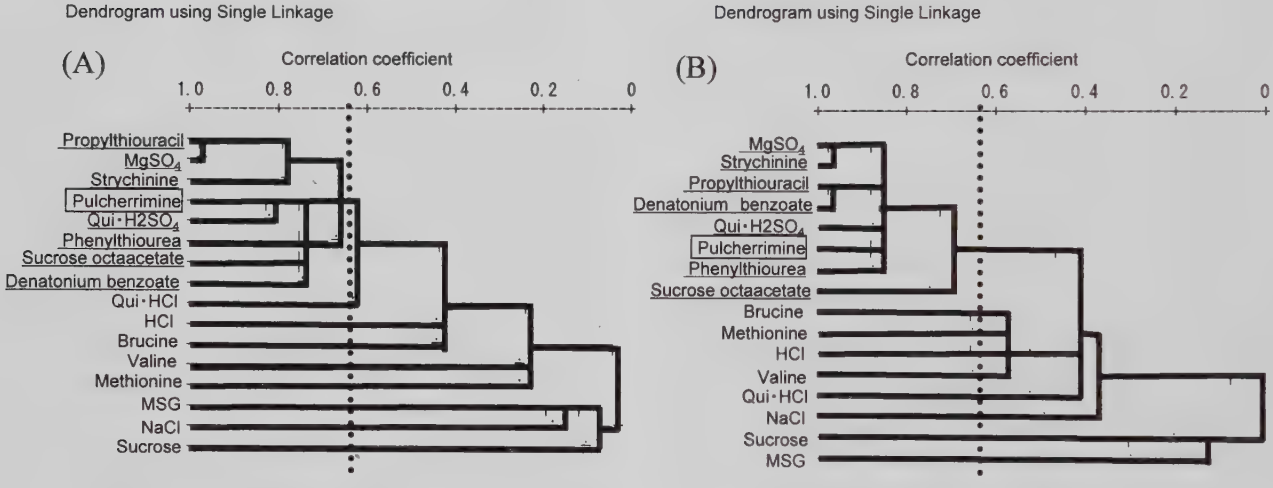


Fig. 19. Clustering of 16 test stimuli in C57BL/6 (A) and BALB/c (B) mice obtained from a hierarchical cluster analysis. A dotted line indicates 1% significant level of Pearson's correlation coefficient. Eight underlined letters indicate to belong in the same group.

to PROP, PTC, $MgSO_4$, QH_2SO_4, SOA and Den in C57BL/6. While in the BALB/c mice, Pul was significantly (t-test, $P<0.05$) generalized to PTC, QH_2SO_4, and SOA. It was commonly observed in the two strains of mice that Pul was weakly (not significantly) or was not generalized to the four basic taste substances (Suc, MSG, NaCl, HCl) and other amino acids.

In order to examine the groupings of the 16 stimuli, a dendrogram for the C57BL/6 (A) and the BALB/c (B) mice, as shown in **Fig. 19**, was drawn according to a hierarchical cluster analysis. In the figure, the dotted line in each dendrogram indicates the 1% significance level of correlation (0.605). At this significance level the 16 stimuli were roughly divided into 9 groups in both strains of mice. The 9 groups were composed as follows; (1) Pul, QH_2SO_4, PTC, PROP and $MgSO_4$, which were the sulfur-containing bitter substances, and SOA, Den and Str, (2) Bru, (3) Met, (4) Val, (5) Qui, (6) HCl, (7) NaCl, (8) Suc and (9) MSG. In this classification, the generalization patterns between almost all the pairs of stimuli within each group (intragroup) were significantly positively correlated with each other ($P<0.05$), and those among all pairs of the different groups (intergroup) were not, suggesting the possibility that the mice roughly discriminate among tastes of the corresponding 9 groups of stimuli, in the two strains of mice. As exceptions, no significant positive correlations were found in each intragroup pair between Pul and Den; PROP and PTC, Den and QH_2SO_4;

SOA and PTC ; $MgSO_4$ and PTC, Den and QH_2SO_4 ; Str and PTC and Den in the C57BL/6 mice, and between PTC and PROP, $MgSO_4$, QH_2SO_4 and Str ; SOA and PROP ; $MgSO_4$ and Str in the BALB/c mice. A significant correlation ($P<0.05$) was observed in each intergroup pair between MSG and Str, and Qui and $MgSO_4$ in the C57BL/6 mice, and between HCl and PTC, Qui and Str and PROP, Bru and SOA, Met and PTC, and Val and Str in the BALB/c mice.

Discussion

Komata *et al.* (1965) elucidated the taste effects of the extractive components from sea urchin gonads, and showed that Val, Leu and Ile contributed to the bitter taste. In the preceding studies, it was found from HPLC analysis and sensory tests that the bitter taste of mature sea urchin ovaries was caused mainly by Pul and not other bitter amino acids (Val, Leu and Ile). Further findings in taste quality of Pul have been made in the present behavioral study in mice using the CTA paradigm.

The generalization patterns to the TSs after conditioning with Pul were observed a difference between C57BL/6 and BALB/c mice. These generalization patterns indicate that Pul may taste bitter to mice and its taste quality differs from amino acids. Thus this fact strongly supports that Pul causes an extraordinary and unacceptable bitter taste in the sea urchin ovaries.

In the two strains of mice, Pul highly generalized to PTC. PTC shows a striking bimodality of the taste threshold in humans (Fox, 1931 ; Snyder, 1931 ; Blakeslee, 1932). The threshold concentrations of 'taster' and 'non-taster' for PTC are 0.025mM and 3mM, respectively (Kalums, 1971).

In the preceding study (Section V-1), it suggested that the taste sensitivity to Pul is higher in BALB/c mice than in C57BL/6 mice. The sensitivity to PTC and also PROP were ascertained to be controlled by a single autosomal gene *Ptc* which locates on human chromosome 5 (Snyder, 1931, Reed *et al.*, 1999). Although the location of the mouse gene *Ptc* has not been clarified, the loci around *Ptc* on human chromosome 5 are suggested to be homologous to mouse chromosome 13. From these facts, the human sensitivity to Pul also might possibly differ among individuals and might be possibly controlled by a single autosomal gene.

The hierarchical cluster analysis showed that Pul was grouped with sulfur-containing bitter substances, SOA, Den and Str, that is, it showed behavioral similarities among Pul, sulfur-containing bitter substances, SOA, Den and Str. While, the Pul group was divided from the basic taste groups, i.e., sweet, salty, sour, umami tastants, other amino acid groups and other bitter substance groups. The bitter taste transduction mechanisms on Den and SOA reception involve production of inositol 1,4,5-triphosphate (IP_3) in rat and mouse taste cells (Hwang *et al.*, 1990 ; Spielman *et al.*, 1994 and 1996). That is to say, Den and SOA activate phospholipase C to accelerate the production of IP_3. IP_3 acts on the endoplasmic reticulum to release Ca^{2+} which is needed for the release of a transmitter from a taste cell (Kashiwayanagi and Kurihara, 1999). Spielman *et al.* (1994) reported that the production IP_3 in mouse taste tissue is stimulated by Str. From these facts, the transduction mechanism of Pul might utilize the pathway involving augmentation IP_3.

Adler *et al.* (2000) described the isolation of a novel family of 40－80 divergent G protein-coupled receptors, T 2 Rs, selectively expressed in subsets of taste receptor cells of the tongue and palate epithelium. Recent genetic studies provide new information regarding the taste receptor and transduction mechanisms. Several mechanisms are thought to be operative for the bitter taste of Pul. Future studies are necessary to clarify the receptor and transduction mechanisms of Pul.

Conclusion

Green sea urchin is hardly the target for fisheries in the Tohoku area, for example, Fukushima Prefecture because of the bitter-taste of their gonads. This study was undertaken for the purpose of efficient use of the green sea urchin.

Since, in a preliminary experiment, the bitterness was found to be specific to mature ovaries, a bitter substance was isolated from the mature ovaries, and the structure was determined to be 4*S*-(2'

-carboxy-2'*S*-hydroxyethylthio)-2*R*-piperidinecarboxylic acid, being a novel sulfur amino acid. This substance was named pulcherrimine (Pul) after the scientific name of green sea urchin.

It was found that the GI values showed a considerable variation among the mature specimens in each season, and mature individuals of which ovaries taste bitter were found in all seasons by the tri-monthly examinations. Therefore, the reproductive cycle seems to be unclear and the mature stage extends over a long term in this sea area. These facts may be due to the relatively low water temperature. From these findings, it was concluded that the presence of mature individuals of which ovaries include Pul in all seasons is the major reason for that green sea urchins are hardly utilized for food in the Iwaki area. For the achievement of efficient utilization of this species of sea urchin, their reproductive cycle which varies with individuals must be firstly taken into consideration, although an important question remains still open as to the formation and/or accumulation mechanisms of Pul in the mature ovary of the sea urchin.

The results of the sensory tests confirmed that Pul is the bitter principle present in the green sea urchin ovaries. Furthermore, the bitterness was observed to be weaken by high-molecular-weight compounds (HMWC) present in the extracts of the green sea urchin gonads. However, a further study in relation to the effects of HMWC and extractive components on the bitter taste of Pul is necessary.

The aversion thresholds for Pul in C57BL/6 and BALB/c mice suggested that the taste sensitivity of Pul was higher in BALB/c mice than in C 57BL/6 mice. The generalization patterns indicated that Pul may taste bitter to mice and its taste quality differs from bitter amino acids. The hierarchical cluster analysis showed that Pul was grouped with sulfur-containing bitter substances so far known. Further detail studies on the taste receptor and the transduction mechanism of bitter tastants including Pul should prove to be needed and interesting.

Acknowledgments

The author is deeply indebted to Prof. Morihiko Sakaguchi, Division of Applied Biosciences, Graduate School of Agriculture, Kyoto University, for his guidance and encouragement during the present study.

The author is greatly obliged to Prof. Shiro Konagaya, Department of Home Economics, Kokugakuin Tochigi Junior College, for critical reading of the manuscript. The author is grateful to Prof. Yuzo Ninomiya, Section of Oral neuroscience, Graduate School of Dental Science, Kyushu University, for his valuable suggestions and useful comments on the behavioral experiments and Dr. Noriko U. Sata, Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Keio University, for her contribution to the structure determination.

The author is also grateful to Prof. Michio Shigei, Department of Applied Biology, Faculty of Textile Science, Kyoto Institute of Technology, for the species identification, and Dr. Tatsuya Unuma, National Research Institute of Aquaculture, for his help in the histological experiments. The author is obliged to Mr. Tatsuya Yamamoto, Fukushima Fishery Office, and Mr. Hiroo Yamada, Fukui Prefectural Fisheries Experimental Station, for their help in the sample collection.

The author is indebted to Dr. Jun-ichi Nakazoe and Dr. Ichiro Oohara, National Research Institute of Fisheries Science, Dr. Masahito Yokoyama, Japan International Research Center for Agricultural Sciences, Dr. Masakatsu Yamazawa, Japan Sea Fisheries Research Institute and Dr. Kazuki Shinohara, National Food Research Institute, for their helpful suggestion and discussions. The author wishes to thank Dr. Masaki Kaneniwa and Dr. Ryuji Kuwahara, for their assistance and encouragement.

References

Adler E., Hoon M.A., Mueller K.L., Chandrashekar J., Ryba N.J.P. and Zucker C.S. (2000) A novel family of mammalian taste receptors. *Cell*, **100**, 693－702.

Agatsuma Y. (1992) Annual reproductive cycle of the sea urchin, *Hemicentrotus pulcherrimus* in southern Hokkaido. *SUISANZOSHOKU*, **40**, 475－478. (in Japanese)

Archer T. and Sjoden P.-O. (1979) Positive correlation be-

tween pre-and postconditioning saccharin intake in taste-aversion learning. *Animal Learning and Behavior*, **7**, 144－148.

Bachmanov A.A., Tordoff M.G., Beauchamp G.K. (2000) Intake of umami-tasting solutions by mice : a genetic analysis. *J. Nutr.*, **130**, 935S－941S.

Bartoshuk L.M. (1978) The psychophysics of taste. *Am. J. Clin. Nutr.*, **32**, 1622－1627.

Bax A., Aszalos A., Dinya Z. and Sudo K. (1986) Sturucture elucidation of the antibiotic desertomycin through the use of new two-dimensional NMR techniques. *J. Am. Chem. Soc.*, **108**, 8056－8063.

Bayer E., Grom E., Kaltenegger B. and Uhmann R. (1976) Separation of amino acids by high performance liquid chromatography. *Anal. Chem.*, **48**, 1106－1109.

Benson J.R. and Hare P.E. (1975) *o*-Phthalaldehyde : fluorogenic detection of primary amines in the picomole range. Comparison with fluorescamine and ninhydrin. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, **72**, 619－622.

Blakeslee A.F. (1932) Genetics of sensory thresholds : taste for phenyl-thio-carbamide. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, **18**, 120.

Bocchi V., Casnati G., Dossena A. and Marchelli R. (1979a) Esterification of amino acids and dipeptides under mild conditions ; Part Ⅰ : via phase transfer catalysis. *Synthesis*, 957－961.

Bocchi V., Casnati G., Dossena A. and Marchelli R. (1979b) Esterification of amino acids and dipeptides under mild conditions ; Part Ⅱ : via sodium salts. *Synthesis*, 961－962.

Bures J., Bermudez-Rattoni F. and Yamamoto T. (1998) *Conditioned Taste Aversion, Memory of a Special Kind.* Oxford University Press, Oxford.

Chandrashekar J., Mueller K.L., Hoon M.A., Adler E., Feng L., Guo W., Zucker C.S. and Ryba N.J.P. (2000) T2Rs Function as bitter taste receptors. *Cell*, **100**, 703－711.

Chang J. Y., Knecht R. and Braun D.G. (1981) Amino acid analysis at the picomole level. Application to the C-terminal sequence analysis of polypeptides. *Biochem. J.* **199**, 547－555.

Chang J.Y, Knecht R. and Braun D.G. (1982) A complete separation of dimethylaminoazobenzenesulphonyl-amino acids. Amino acid analysis with low nanogram amounts of polypeptide with dimethylaminoazobenzenesulphonyl chloride. *Biochem. J.*, **203**, 803－806.

Dale J.A. and Mosher H.S. (1973) Nuclear magnetic resonance enantiomer reagents. Configurational correlations via nuclear magnetic resonance chemical shifts of diastereomeric mandelate, *o*-methylmandelate, and α-methoxy-α-trifluoromethylphenylacetate (MTPA) esters. *J. Am. Chem. Soc.*, **95**, 512－519.

FAO FISHERY STATISTICS-catches and landings (1995), Vol. **80**, Italy.

Fox A.L. (1931) Taste blindness. *Science*, **73**, 14.

Fuji A. (1960) Studies on the biology of the sea urchin. I. Superficial and histological gonadal changes in gametogenic process of two sea urchins, *Strongylocentrotus nudas* and *S. intermedius*. *Bull. Fac. Fish., Hokkaido Univ.*, **11**, 1－14.

Fuke S. and Konosu S. (1991) Taste-active components in some foods : a review of Japanese research. *Physiol. Behav.*, **49**, 863－868.

Fuller J.L. (1974) Single-locus control of saccharin preference in mice. *J. Hered.*, **65**, 33－36.

García J., Kimmeldorf D. and Koelling R.A. (1955) Conditioned aversion to saccharin resulting from exposure to gamma radiation. *Science*, **122**, 157－158.

Hashimoto Y. (1965) Taste-producing substances in marine products. In *the technology of fish utilization* (Edited by Kreuzer R.), pp.57－61, Fishing news Ltd., London.

Hoshikawa H., Takahashi K., Sugimoto T., Tuji K. and Nobuta S. (1998) The effects of fish meal feeding on the gonad quality of cultivated sea urchins, *Strongylocentrotus nudus* (A. AGASSIZ). *Sci. Rep. Hokkaido Fish. Exp. Stn.*, **52**, 17－24.

Hwang P.M., Verma A., Bredt D.S. and Snyder S.H. (1990) Localization of phosphatidylinositol signaling components in rat taste cells : Role in bitter taste transduction. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, **87**, 7395－7399.

Ito S., Shibayama M., Kobayakawa A. and Tani Y. (1989) Promotion of maturation and spawning of sea urchin *Hemicentrotus pulcherrimus* by regulating water temperature. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **55**, 757－763 (in Japanese).

Iwasaki K., Kasahara T. and Sato M. (1985) Gustatory effectiveness of amino acids in mice : behavioral and neurophysiological studies. *Physiol. Behav.*, **34**, 531－542.

Kalmus H. (1971) Genetics of taste. In *Handbook of Sensory Physiology* (Edited by Beidler, L.M.), Vol. 4, Part 2, pp 75－101, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.

Kamiyama T., Umino T., Itezono Y., Nakamura Y., Satoh T. and Yokose K. (1995) Sulfobacins A and B, novel von Willebrand factor receptor antagonists. Ⅱ. Structural elucidation. *J. Antibiotics*, **48**, 929－936.

Kasahara T., Iwasaki K. and Sato M. (1987) Taste effectiveness of some D-and L-amino acids in mice. *Physiol. Behav.*, **39**, 619－624.

Kashiwayanagi M. and Kurihara K. (1999) Receptor and transduction mechanisms of bitter substances. *Shinkei Kenkyu no Shinpo*, **43**, 649－657.

Kawana T. (1938) On the propagation of *strongylocentrotus pulcherrimus*. *Suisan Kenkyu Shi*, **33**, 104－116 (in Japanese).

Komata Y., Kosugi N. and Ito T. (1962a) Studies on the extracts of "Uni". Ⅰ. Free amino acid composition. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, **28**, 623－629 (in Japanese).

Komata Y. and Eguchi H. (1962b) Studies on the extracts of "Uni". Ⅱ. Nucleotides and organic bases. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, **28**, 630－635 (in Japanese).

Komata Y., Mukai A. and Okada Y. (1962c) Studies on the extracts of "Uni". Ⅲ. Organic acids and carbohydrates. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, **28**, 747－750 (in Japanese).

Komata Y. (1964) Studies on the extractives of "Uni". Ⅳ. Taste of each component in the extractives. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, **30**, 749－756 (in Japanese).

Lin J. K. and Chang J. Y. (1975) Chromophoric labeling of amino acids with 4-dimethylaminoazobenzene-4'-sulfonyl chloride. *Anal. Chem.*, **47**：1634－1638.

Lush I.E. (1981) The genetics of tasting in mice. Ⅰ. Sucrose octaacetate. *Genet. Res.*, **38**, 93－95.

Lush I.E. (1982) The genetics of tasting in mice. Ⅱ. Strychnine. *Chem.Senses*, **7**, 93－98.

Lush I.E. (1984) The genetics of tasting in mice. Ⅲ. Quinine. *Genet. Res.*, **44**, 151－160.

Lush I.E. (1989) The genetics of tasting in mice. Ⅳ. Saccharin, acesulfame, dulcin and sucrose. *Genet. Res.*, **53**, 95－99.

Lush I.E. (1991) The genetics of bitterness, sweetness and saltiness in strains mice. In *Chemical Senses Vol 3, Genetics of Perception and Communication* (Edited by Wysocki C.J. and Kare M.R.), pp. 227－241. Marcel Dekker, New York.

Lush I.E., Hornigold N., King P., Stoye J.P. (1995) The genetics of tasting in mice Ⅶ. Glycine revisited, and the chromosomal location of *Sac* and *Soa*. *Genet. Res.*, **66**, 167－174.

Matsui I. (1966) *The program of the sea urchins.* Japan Fisheries Resource Conservation Association, Tokyo (in Japanese).

Ming D., Ninomiya Y. and Margolskee R.F. (1999) Blocking taste receptor activation of gustducin inhibits gustatory responses to bitter compounds. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, **96**, 9903－9908.

Miwa K. (1975) Studies on frozen storage of sea urchin gonad. The preventing method for the development of the pungent taste in sea urchin gonad during the frozen storage and the protecting method for the deformation of the gonad at the thawing time. *Bull. Tokai Reg. Fish. Res. Lab.*, **81**, 185－267 (in Japanese).

Monthly Ocean Report (No. 84) December (1999), Climate and Marine Department Japan Meteorological Agency, Japan.

Muramoto K., Kawauchi H. and Tuzimura K. (1978) Sequence determination of peptide by the combined use of fluorescein isothiocyanate and phenylisothiocyanate. *Agric.Biol. Chem.*, **42**, 1559－1563.

Muramoto K., Kamiya H. and Kawauchi H. (1984) The application of fluorescein isothiocyanate and high-performance liquid chromatography for the microsequencing of proteins and peptides. *Anal. Biochem.*, **141**, 446－450.

Murata M and Sakaguchi M (1990) Influence of the ethanol treatment on pHs of boiled meat extracts of fish, shellfish, and domestic animals. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **56**, 1697.

Murata Y., Kaneniwa M., Yamashita Y., Iida H. and Yokoyama M. (1998) Compositions of free amino acids and related compounds in the edible portion of ten salmonid species. *Bull. Natl. Res. Inst. Fish. Sci.*, **11**, 65－73 (in Japanese).

Nachman M. (1963) learned aversion to the taste of lithium chloride and generalization to other salts. *J. Comp. Physiol. Psychol.*, **56**, 343－349.

Ninomiya T., Ikeda S., Yamaguchi S. and Yoshikawa T. (1965) Studies on the taste of amino acids. *Rep. 6th Sensory evaluation symposium*, JUSE, 16－37. (In Japanese)

Ninomiya T., Ikeda S., Yamaguchi S. and Yoshikawa T. (1966) Studies on the taste of various amino acids. *Rep. 7th Sensory evaluation symposium*, JUSE, 109－123. (In Japanese)

Ninomiya Y., Higashi T., Katsukawa H., Mizukoshi T. and Funakoshi M. (1984) Qualitative discrimination of gustatory stimuli in three different strains of mice. *Brain Res.*, **322**, 83－92.

Ninomiya Y. and Funakoshi M. (1989) Behavioral discrimination between glutamate an the four basic taste substances in mice. *Comp. Biochem. Physiol.*, **92A**, 365－370.

Ninomiya Y. and Funakoshi M. (1993) Genetic and neurobehavioral approaches for taste receptor mechanisms in mammals. In *Mechanisms of Taste Transduction* (Edited by Simon S.A. and Roper S.D.), pp. 253－272. CRC Press, Boca Raton.

Ninomiya Y., Kajiura H., Ishibashi T. and Imai Y. (1994) Different responsiveness of the chorda tympani and glossopharyngeal nerves to *L*-lysine in mice. *Chem. Senses*, **19**, 617－626.

Ninomiya Y (1999) Genetic approaches for taste receptor and transduction mechamisms. *Shinkei Kenkyu no Shinpo*, **43**, 674－681.

Ohtani I., Kusumi T., Kashman Y. and Kakisawa H. (1991) High field FT NMR application of Mosher's method. The absolute configurations of marine terpenoids. *J. Am. Chem. Soc.*, **113**, 4092－4096.

Patton S. and Josephason D.V. (1957) A method for determining significance of volatile flavor compounds in foods. *Food Res.*, **22**, 316－318.

Pfaffmann C., Bartoshuk L.M. and McBurney D.H. (1971) Taste psychophysics. In *Handbook of Sensory Physiology* (Edited by Beidler L.M.), Vol. 4, Part 2, pp 75－101, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.

Pritchard T.C. and Scott T.R. (1982) Amino acids as taste stimuli. Ⅱ. Quality coding. *Brain Res.*, **253**, 93－104.

Reed D.R., Nanthakumar E., North M., Bell C., Bartoshuk L.M. and Price A.R. (1999) Localization of a gene for bitter-taste perception to human chromosome 5p15. *Am. J. Hum. Genet.*, **64**, 1478－1480.

Roth M. (1971) Fluorescence reaction for amino acids. *Anal. Chem.*, **43**, 880－882.

Schiffman S.S. (1976) Taste of dipeptides. *Physiol. Behav.*, **17**, 523－535.

Schiffmann S.S., Sennewald K. and Gagnon J. (1981) Comparison of taste qualities and thresholds of *D*- and *L*-amino acids. *Physiol. Behav.*, **27**, 51－59.

Shin-ya K., Shimizu S., Kunigami T., Furihata K., Furihata K. and Seto H. (1995) A new neuronal cell protecting substance, lavanduquinocin, produced by *Streptomyces viridochromogenes*. *J. Antibiotics*, **48**, 574－578.

Snyder L.H. (1931) Inherited taste deficiency. *Science*, **74**, 151.

Solms J., Vuataz L. and Egli R.H. (1965) The taste of *L*- and *D*-amino acids. *Experientia*, **21**, 692－694.

Spackman D.H., Stein W.H. and Moore S. (1958) Automatic recording apparatus for use in the chromatography of amino acids. *Anal. Chem.*, **30**, 1190.

Spielman A.I., Huque T., Nagai H., Whitney G. and Brand J.G. (1994) Generation of inositol phosphates in bitter taste transduction. *Physiol. Behav.*, **56**, 1149－1155.

Spielman A.I., Nagai H., Sunavala G., Dasso M., Breer H., Boekhoff I., Huque T., Whitney G. and Brand J.G. (1996) Rapid kinetics of second messenger production in bitter taste. *Am. J. Physiol.*, **270**, C926－C931.

Summers M.F., Marzilli G. and Bax A. (1986) Complete ^{1}H and ^{13}C assignments of coenzyme B12 through the use of new two-dimensional NMR experiments. *J. Am. Chem. Soc.*, **108**, 4285－4294.

Unuma T., Konishi K., Furuita H., Yamamo T. and Akiyama T. (1996) Seasonal changes in gonads of cultured and wild red sea urchin, *Psudocentrotus depressus SUISANZOSHOKU.*, **44**, 169－175.

Wakabayashi K. (1984) *Processing of Experimental Data.* Baifu-kan, Tokyo (in Japanese).

Warren R.P. and Lewis R.C. (1979) Taste polymorphism in mice involving a bitter sugar derivative. *Nature*, **227**, 77－78.

Yamaguchi S. and Kobori I. (1994) Humans and appreciation of the umami taste. In *Olfaction and Taste XI* (Edited by Kuruhara K., Suzuki N. and Ogawa H.), pp. 353－356, Springer-Verlag, Tokyo.

Yoshida M. and Saito S. (1969) Multidimensional scaling of the taste of amino acids. *Jap. Psychol. Res.* **11**, 149－166.

水研センター研報，第3号，63－132，平成14年
Bull. Fish. Res. Agen., No. 3 63－132, 2002

博士号論文

西部北太平洋熱帯域におけるカツオの初期生態に関する研究

田邉　智唯*

Studies on the early life ecology of skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, in the tropical western-north Pacific.

Toshiyuki TANABE*

Abstract The objective of this study is to provide new information on the early life ecology of skipjack tuna. It is necessary to clarify the recruitment process of the skipjack tuna population and to establish a basis for stock management in the western Pacific.

In order to collect large number of juvenile skipjack tuna, a new sampling protocol and associated gear were developed. The midwater trawl net TANSYU had a estimated mouth opening of 20m×20m, 72m total length, 1000－57mm mesh size at the body, 8mm mesh size at the codend, and 5 knots maximum towing speed. A total of 497 tows was conducted in the tropical western Pacific (0－20°N, 130－160°E), from October to December during the years 1992－1996, resulting in the collection of 6724 skipjack, 6－172mm standard length (SL), and 0－1163 individuals (inds) 1 hr tow. These results indicate the establishment of a new sampling method for capturing much larger numbers of juvenile skipjack tuna than was possible using the sampling gear of previous studies. In addition, samples of 1373 other tunas, 8－140mm SL, 0－128 inds 1 hr tow, were collected. These results verify that the TANSYU is an effective sampling gear for juveniles of not only skipjack tuna but also of other tunas and large oceanic fishes.

Juvenile skipjack tuna are widely distributed in the north equatorial current area (NEC), the north equatorial counter current area (NECC), and the boundary area of these two currents. Vertically, juvenile skipjack tuna appeared mainly from the lower portion of the mixed layer to the upper portion of the thermocline. The abundance indices, frequency of occurrence (%) and density (inds/1 hr tow) were calculated as 61% and 17inds/1 hr tow at the NECC, 35% and 6 inds 1 hr tow at the boundary, and 32% and 15 inds/1 hr tow at the NEC. The distributional pattern of juvenile skipjack tuna was different by year. The characteristics of the horizontal distribution of juvenile skipjack were as follows. During 1992 and 1994, juvenile skipjack tuna were relatively abundant in the southern area but poor in the northern area. During 1995, high concentrations of juveniles in the eastern area appeared. During 1993 and 1996, wider distributions with no clear differences between localities were observed. Young skipjack were collected only from the NECC at night, and were distributed mainly in the lower portion of the mixed layer.

The vertical distribution of skipjack changed with growth stages. For daytime in the NECC, larvae at the metamorphosis stage of around 10mm SL are distributed through depths of 0－200m, and juveniles after metamorphosis of 10－40mm SL are distributed through depths of 0－220m. Juveniles of 50－60mm SL are distributed through depths of 60－140m. Juveniles of 70－80mm SL are concentrated at about 90m depth. The vertical distribution of juvenile skipjack is related to the vertical temperature profile, with a shallower thermocline corresponding to a shallower

2002年3月13日受理（Accepted on March 13, 2002）
水産総合研究センター業績 A 第16号（Contribution No.A 16 from Fisheries Research Agency）
* 遠洋水産研究所　〒424-8633　静岡県清水市折戸5-7-1（National Research Institute of Far Seas Fisheries, 5-7-1, Orido, Shimizu, Shizuoka 424-8633, Japan）

distribution of juveniles and a deeper thermocline resulting in a deeper distribution of juveniles. The vertical distribution of juvenile skipjack is also related to the distribution of other organisms sampled. This result indicates that juvenile skipjack are preferentially distributed in the abundant layers of other organisms collected by the midwater trawl net.

In contrast, other juvenile tuna, *Thunnus spp*. including yellowfin tuna *Thunnus albacares* and bigeye tuna *Thunnus obesus* are mainly distributed in the mixed layer shallower than about 80m depth in the NECC, indicating a clear difference with juvenile skipjack. The physical charasteristics of distribution area of juvenile skipjack is mainly from 20 to 29℃ temperature and from 33.6 to 35.5PSU salinity. Those of other juvenile tuna ranged from 26 to 29℃ temperature and from 33.6 to 33.7PSU salinity. These results indicate that skipjack and other tuna juveniles have habitat segregation in the pelagic ocean of the tropical western Pacific.

The stomach contents of skipjack and other tuna juveniles collected from the NEC and NECC areas were analyzed. The importance of each organism as a prey of skipjack or other tuna juveniles was evaluated by the index of relative importance of prey taxa (IRI). The IRI of fish larvae for juvenile skipjack was remarkably high, 14107 in the NEC and 10852 in the NECC. These data indicate that fish larvae are the principal diet of juvenile skipjack. In the NEC, Euphausiacea (IRI=162), Amphipoda (9.2), and Copepoda (0.3) appeared. In the NECC, Copepoda (IRI=158.4), Cephalopoda (66.8), Euphausuiacea (24.8), and others including Saggitoidea, Isopoda, and fish eggs (11.6), and Amphipoda (2.1) appeared. Unidentified organisms comprised the second-highest score of the IRI, 214.4 in the NEC and 346.5 in the NECC. These organisms were consisted mainly of digested fish larvae.

Diel periodicity of feeding activities of juvenile skipjack was studied, based on the temporal change in the stomach content index (SCI), stomach fullness, and digestion index. The percentage of empty stomachs was 100% at 22－02 hours, 80% at 02－06 hours, and decreased rapidly after sunrise, reaching the minimum score of 5.3% at 14－18 hours (before sunset). In contrast, the percentage of full stomachs reached the maximum score of 60.6% at 14－18 hours, and decreased to 0% from 22 to 06 hours. The SCI and digestion index also indicated the maximum score at 14－18 hours in contrast with the minimum score at before sunrise. Therefore, juvenile skipjack are actively feeding during daytime from morning to sunset, but they do not feed at night.

The stomach contents of other juvenile tuna were characterized by extremely high scores of fish larvae with no clear difference between the NEC and NECC; the only occurrences of other prey organisms were Euphausiacea and Cephalopoda. These data show that other tuna are stronger piscivourous feeders than skipjack during the juvenile stage. Feeding activities of other juvenile tuna occur during daytime, similar to skipjack juvenile.

In order to clarify the growth of skipjack during the early life stages, daily otolith increments were analyzed. Samples from skipjack larvae and juveniles were collected during 1994 to 1997. The otolith measurement system (Ratoc System Engineering Inc., Tokyo) was used for counts of growth increments and measurements of increment width. Daily growth increments were validated by marginal increment analysis for juvenile skipjack.

Growth rate from larva to juvenile stages of skipjack was studied using the relationship between body length and the number of daily increments of 548 individuals (3.3 to 57.7㎜ SL). In 15 samples from 1996 and 1997 (3.3 to 7.8㎜ SL), daily growth rate was slow, 0.55㎜ day at 3 to 9 days old. In 285 samples from 1994 (9 to 24 days old), daily growth rate rapidly increased to 3.3㎜/day, and for 248 samples from 1995 (9 to 29 days old) growth was 2.5㎜ day. The estimated length at 30 days after hatching was about 60㎜ SL. After metamorphosis from larva to juvenile at 10 to 12 days after hatching, a period of extremely rapid growth with large individual variation was observed. Juvenile skipjack growth rates depend on hatching year and

nursery area. The analyses of distance from core to margin at each otolith increment show that a larger individual had a faster growth period after 5 days after hatching. A rapid growth in the early life stage enables the utilization of larger prey organisms, resulting in increased survival rates in the nursery ground that are nutritionally poor. Consequently, these characteristics play an important role in maintaining the population level of skipjack in the pelagic ocean of the tropical western Pacific.

目　　次

第1章　研究史
幼稚仔魚の採集法
直接採集法による採集例
間接採集法による採集例
研究史から見た幼稚仔魚採集法の課題
生活史初期における分布
卵から仔魚期における分布
稚魚期から幼魚期における分布
摂餌生態
各成長段階における食性と摂餌行動
捕食者と共食い現象
初期成長
カツオの年齢と成長
初期成長
発育段階の区分

第2章　新たな幼稚魚採集法の確立
材料および方法
採集漁具の検討
カツオ幼稚魚採集用中層トロールの
設計概念と仕様
調査海域，時期および調査船
採集方法
標本の取り扱い
結　　果
TANSYU-1，2型中層トロールの曳網特性
TANSYU-2型中層トロールによる
カツオ幼稚魚の採集結果
カツオ・マグロ類以外の採集生物
中層トロール網以外の漁具による採集結果
考　　察

第3章　稚魚期から幼魚期にかけての分布生態
材料および方法
調査時期，調査海域および調査船
採集方法
海洋物理環境要因
実験室での標本処理とデータ解析
稚魚期と幼魚期の発育段階区分
結　　果
物理環境要因による海域区分
カツオ幼稚魚の水平・鉛直分布
マグロ属幼稚魚の水平・鉛直分布
その他の採集生物の生物量と
カツオ・マグロ類稚魚の出現状況
考　　察
西部太平洋の熱帯外洋域における
カツオ稚魚および幼魚の分布
幼稚魚の分布と海洋環境要因との関係
カツオと熱帯性マグロ類の分布の違い
熱帯外洋域における
カツオ幼稚魚の分布と生態戦略

第4章　摂餌生態
材料および方法
供試魚の採集方法
餌生物としての魚類仔魚の採集方法
胃内容物の分析方法
食性と摂餌行動の分析方法
結　　果
カツオ稚魚の摂餌生態
マグロ属稚魚の摂餌生態
カツオの餌としての魚類仔魚の分布
考　　察

第5章　初期成長
材料および方法
カツオ仔稚魚標本の採集と保存
耳石の摘出と輪紋観察のための前処理
耳石日輪の計測と解析
結　　果
耳石および輪紋の形態変化
輪紋形成周期の検証
耳石日輪解析による仔稚魚期の成長
考　　察
西部太平洋熱帯海域における
カツオの初期成長様式

カツオの初期成長と生残戦略
要 約
謝 辞
引用文献

第1章 研究史

カツオ *Katsuwonus pelamis* は，高度回遊性魚類の1種として知られ，全世界の大洋の低緯度海域から中緯度海域に至る広大な外洋表層域を生活圏としている。西部太平洋では，本種はおよそ45°N から45°S にわたって出現し（Matsumoto *et al*. 1984），低緯度海域（20°S～20°N）を再生産場，中緯度海域（北半球では30～42°N）を索餌場として，南北方向を中心とした大規模な季節回遊を行う。そのため，中緯度海域ではカツオの来遊とともに漁獲が始まり，本種に対する漁業もその回遊生態を利用する形で発達してきた。本種が大規模な群を形成して来遊する日本列島周辺では，古くから竿釣りや曳き縄を中心として漁獲され，近年ではまき網による漁獲も目立つようになった。一方，低緯度海域では，日本をはじめとして韓国，アメリカ合衆国などの遠洋漁業国だけでなく，多数の沿岸漁業国が主要な漁獲対象種の1つとしている。西部太平洋熱帯海域における年間総漁獲量は，1970年代から1990年代にかけて増加の一途をたどり，1997年の総漁獲量は約80万トンに達している（FAO 1999）。したがって，本種の西部太平洋における国際的な漁業資源としての重要性は，1980年代以降ますます高くなっており，本種の生態解明は，高度回遊性魚類の生態解明という学術的な意味だけでなく，国際的な資源管理の基礎を築くという面からの意義も大きい。

本種の生物学的研究は，漁業の発達とともに1950年代から西部太平洋および東部太平洋に於いて，仔魚及び成魚を中心として活発に進められてきた（川崎 1965，Matsumoto *et al*. 1984）。しかしながら，カツオ資源の生物学的な特性を把握するために不可欠である本種の生活史については，充分に解明されているとは言い難い。とりわけ稚魚期から幼魚期にかけての生態学的知見は，仔魚期や成魚期に比較して明らかに乏しい。カツオがこの時期にどこでどのような生活をしているのか，といった詳しい知見はほとんど得られていない。稚魚期，幼魚期の分布や摂餌，成長，移動に関しては断片的な知見から推察が行われているのみであった。本研究を行うに至った直接の端緒は，このようなカツオの初期生態研究における知見の欠如である。本章では，カツオの初期生態を中心としたこれまでの研究史をまとめることにより，本研究の背景と意義を明らかにすることを目的とした。

幼稚仔魚の採集法

漁業からの情報が得られない幼魚期以前のカツオを採集するために，これまでに用いられてきた方法は，大きく分けて2通りに分類することができる。一方は，稚魚ネットやボンゴネットなど開口部が円形をしたリングネット類，IKMT をはじめ一般にリングネット類よりも大型で高速曳網が可能なトロールネット類，開口部フレームに環境センサーと開閉装置を搭載し多層連続採集を可能とした MOCNESS などにより対象生物を直接採集する方法（ここでは直接採集法と称する）である。もう一方は，カツオ・マグロ類のように遊泳能力が高く，直接採集法では採集が困難な生物に対し，それらの捕食者をはえ縄などの漁具により採集し，その胃内容物から対象生物を収集する方法（ここでは間接採集法と称する）である。直接採集法では，分布，移動，成長など対象生物に関する貴重な情報が得られるため，ほとんどの海洋生物の生態調査に対して用いられてきた。これに対して，間接採集法では，対象生物の捕食者を媒体とする点で得られる情報に制約があるが，漁業関係者からの協力を得られるならば広範な海域とあらゆる時期の標本収集が可能になるなど，直接採集法に比べてコストや労力などが低くて済む利点がある。これまでの研究では，直接採集法では主に仔稚魚期のカツオを，間接採集法では主に稚魚期から幼魚期のカツオを採集するといったように，両者の特性に応じた使い分けがなされてきた。本節では，それぞれの採集法を用いてなされてきた過去の研究例をまとめて紹介するとともに，それらの結果によって明らかになったカツオの幼稚仔採集における課題について述べる。

直接採集法による採集例

矢部(1955)によれば，太平洋におけるカツオ仔稚魚の採集に関する報告は，岸上鎌吉が大正末期から昭和初期にかけてプランクトンネットにより体長3－6㎜の後期仔魚6個体を採取したのがはじまりとされている（岸上 1926）。その後1940年代後半から1950年代にかけて，日本とアメリカ合衆国の研究者により，多数の採集結果が報告された。この時代に直接採集法として用いられた漁具は，開口部直径（以下口径と称す

る）1mのプランクトンネットが中心であった。Wade（1951）は1947年から1949年にフィリピン周辺海域で季節的なサンプリングを行い，全長4－9㎜のカツオ仔魚154個体を得た。矢部（1955）は，本邦南岸，マリアナおよびカロリン東方沖において全長5－9㎜のカツオ仔魚10個体を，Matsumoto（1958）は中・東部太平洋低緯度海域（15°S－25°N, 180－120°W）において，全長2－20㎜のカツオ仔稚魚476個体を，いずれも口径1mのプランクトンネットにより採集した。その後もStrasburg（1960）をはじめとして，プランクトンネットは広く仔魚採集に使用され，主として仔魚期の分布に関する知見の蓄積に貢献した。西川ら（1985）は，口径1.4mまたは2mの稚魚ネットを使用し，1956年から1981年までの長期にわたり太平洋，大西洋，インド洋の低緯度から中緯度におよぶ広範な海域でのカツオ・マグロ類仔稚魚採集を行い，魚種別，季節別の出現状況を分布図にまとめて示した。

トロールネット類でのカツオ仔稚魚採集は，1960年代から行われており，これまで4つの報告がなされている。Matsumoto（1961）は開口部面積111.7㎡のBritish Colombia midwater trawl（Barraclough and Johnson 1956）を用いて中央太平洋でサンプリングを行い，尾叉長6－53㎜のカツオ仔稚魚33個体を，King and Iversen（1962）は，4種類のネット（6フィート型ビームトロール，6フィートおよび10フィート型IKMT，1m型リングネット）を使用し，中央太平洋で18－60㎜のカツオ・マグロ類稚魚6個体を採集した。Higgins（1970）はハワイ諸島沖においてAnchovy No. 2 Cobb Pelagic Trawl（開口部幅12m，高さ8mのトロール網）を使用し，昼夜2水深帯での層別採集を行った。その結果，体長7－47㎜のカツオ仔稚魚578個体とともにキハダ *Thunnus albacares*，メバチ *Thunnus obesus* など多数のマグロ類仔稚魚を採集することに成功した。また，宅野・上柳（1978）は，全長22.5mのトロール網を使用してマリアナ沖からパプアニューギニア東沖にかけてサンプリングを行い，カツオ仔稚魚20個体（体長8－31㎜）を採集している。トロールネット類は，一般にリングネット類よりも大型であるため，曳網のための設備も大規模となり操作時の手間も多くかかることになるが，その反面でリングネット類よりも大型の標本を多く採集することが可能である。

近年では，カツオ・マグロ類仔魚の分布生態を明らかにする目的で，口径70cm型ボンゴネット（Davis *et al*. 1990）や1㎡型MOCNESS（Boehlert and Mundy 1994）による採集例も報告されている。これらの方法により採集されたカツオ・マグロ類は，いずれも体長8㎜以下の仔魚が大部分を占めていた。また，Davis *et al*.（1989）は，70cm型リングネットと2m型稚魚ネットにおけるマグロ類仔魚に対する採集特性の違いを検証し，使用するネットと曳網方法により採集結果が異なることを示した。飯塚ら（1989）は，浮き刺網を用いて西部太平洋低緯度海域でカツオ幼魚の採集を試み，3年間の調査を通じて体長12－29cmのカツオ幼魚49個体を採集した。

以上のような種々のネット類による能動的な採集活動とは別に，仔稚魚のすう光性を利用した集魚灯採集の例もある。ハワイ周辺では，1950年代より集魚灯でカツオ仔稚魚を集め，小型の敷き網類で採集する方法が用いられてきた。Shimada（1951）は，フェニックス諸島周辺で採集を試み，体長20－48㎜のカツオ稚魚6個体を，またThorrold（1993）は，Light trapと呼ばれる採集装置を海中に設置し，オーストラリア北東沿岸のグレートバリアリーフにおいて，体長12－32㎜のマグロ属稚魚34個体を採集している。森（1972）によれば，これ以前にも集魚灯を使って採集を試みた例がいくつかあるが，いずれもカツオ仔稚魚の生態的な特性を検討するために充分な標本数が得られなかったことから，効果的な採集とは見なされていない。結論としてカツオ幼稚魚の直接採集法としては，開口部面積が100㎡以上の大型トロールネットが現在のところ最も有効な手段ということができる。

間接採集法による採集例

カツオ・マグロ類とカジキ類は，古くからカツオ幼稚魚の捕食者であることが知られ，直接採集法による捕獲が難しい稚魚期以降のカツオに対する効果的な採集法の1つとして，これらの胃内容物または吐出物から標本を収集することが1940年代後半以降行われてきた。Eckles（1949）は，ハワイ周辺海域でのマグロ漁場開発調査において漁獲されたカツオ成魚の胃内容物より全長183㎜のカツオ幼魚1個体を，吐出物より全長113－118㎜のカツオ幼魚6個体を，堀田（1953）は，薩南海域で漁獲されたカツオの胃内容物および吐出物より，体長3－18cmのカツオ幼稚魚60個体を得ている。須田（1953）は，小笠原諸島周辺からミクロネシア周辺で漁獲されたマグロ・カジキ類の胃内容物からカツオ幼稚魚を収集し，形態観察だけでなく季節的，海域的な出現状況および体長組成についても考察した。このように，間接採集法により広範な海域と時期にわたる収集を行い，本種の初期生態研究に応用した例は他にもみられる。Yoshida（1971）は，中央太平洋のハワイ周辺および南緯側低緯度海域（5－32°S, 179°E－135°W）においてカジキ類の胃内容物からカツオ幼稚魚1742個体を採集し，海域的・季節的な出現状況と体長組成から，この海域におけるカツオの成長と産卵

について考察した。さらに森（1972）は，太平洋だけでなく大西洋とインド洋をも含めた広範な大洋からマグロ・カジキ類の胃内容物を収集し，その中から合計5851個体のカツオを得て解析することにより，各成長段階別の地理的分布を示すとともに，季節別・海域別相対密度から太平洋におけるカツオの産卵・発生について考察した。飯塚ら（1989）は，中西部太平洋低緯度海域において竿釣りで漁獲されたカツオの吐出物を中心に幼稚魚を収集し，カツオの共食い現象についても考察している。

吐出物による幼稚魚採集は，一般に目的とする標本が捕食されてからの経過時間が短いため，胃内容物からの採集に比べて鮮度が高く原形に近い標本を得ることができる。しかしながら，これらの間接採集法では，カツオ幼稚魚の採集量が捕食者に対する努力量と捕食者の摂餌量に強く影響を受ける点で採集結果を定量的に論じることは困難である。

研究史から見た幼稚仔魚採集法の課題

本節では，採集方法による区分に基づいてカツオの初期生活史段階を対象とした採集例を紹介したが，これらの報告からカツオの採集法における課題についてここで言及する。落合・田中（1998）によれば，カツオは全長12㎜前後から稚魚期に入る。これまで用いられてきたネット類での採集結果では，稚魚期に分類される標本はごく一部であり，ほぼすべての調査において体長３－８㎜の後期仔魚が標本の主体を占めていた。カツオ稚魚が採集されなかったことについて，多くの研究者がネットからの逃避行動に原因があると考えた。その根拠として，Davis *et al*.（1990）は，カツオとミナミマグロ *Thunnus maccoyii* 仔魚の採集個体数と体長組成が夜間と昼間において異なること，すなわち夜間の方が昼間より採集量が多く体長も大きいことを挙げている。つまり，仔稚魚の体長とネットに対する反応距離によって彼らの逃避効率は決定されるため，昼間はより視覚の発達した大きな個体ほどネットが近づいてくるのを早く感知し，より高速で捕獲から逃れることができると考えられた。このことから，彼らはカツオ・マグロ類仔魚の定量採集を行うための曳網方法として，夜間に海面から表層混合層の下端までの傾斜曳きが有効であると結論づけた。Higgins（1970）は，曳網時間帯及び水深別のカツオ仔稚魚採集結果から，彼らが昼夜の鉛直移動を行って未明には表層で分布密度が高くなることを示し，より多くのカツオ仔稚魚を採集しようとすれば夜明け前から早朝にかけて表層で曳網を行うことが有効であると述べている。

これまでの研究結果から，稚魚期以降のカツオを採集するためには，彼らの遊泳能力，あるいは漁具に対する逃避能力をいかに上回ることができるかが最も重要な点であると考えられる。カツオ・マグロ類は，魚類の中でも最も遊泳能力の発達した仲間とされ（Magnuson 1978），成長とともに遊泳速度は著しく増大すると考えられる。したがって，彼らの分布，密度や移動などの生態に関する定量的調査を目的とするならば，遊泳中のカツオを採集することができる漁具を開発する必要がある。これまでの漁具で採集可能なカツオ・マグロ類の体長は，いずれもごく狭い範囲の仔魚に限られており，既存の方法によって稚魚期から幼魚期における生態調査を実施することは困難である。本研究では，このような背景からまず第１にカツオ幼稚魚の新たな採集法の確立を目指したが，その結果については第２章で詳しく述べる。

生活史初期における分布

カツオは外洋表層域という広大な場において大規模な回遊をしながら生活史を送っている。その移動範囲は，成長に伴う遊泳能力の発達とともに低緯度域から中緯度域へと拡大し，マグロ類の中でも最大の分布域を占めている。本種の初期生活史の場となるのは，周年高水温が保たれ比較的経年変動も少ない熱帯海域である。本節では，カツオが初期生活史の各段階においてどのような分布を示すのか，という点に着目してこれまでの知見を整理した。

卵から仔魚期における分布

カツオの卵は形態的に他のマグロ属と区別ができないために，本種の産卵生態について詳しいことは解っていない。しかしながら，これまで広範な海域で行われた仔稚魚の分布調査の結果から（Matsumoto *et al*. 1984，西川ら 1985，上柳 1969），本種は熱帯から亜熱帯にかけての広大な海域を産卵場として利用し，膨大な数の浮遊卵を産むと考えられている（Hunter *et al*. 1986）。西部太平洋でのカツオの産卵域は，35°Ｎから24°Ｓに及び，主産卵域での表面水温は28℃から30℃とされる（永沼 1979）。

太平洋におけるカツオ仔魚の分布範囲はきわめて広く，赤道を挟んだ低緯度海域を中心として中緯度海域にまで達し，マグロ類の中では最大の出現範囲を示すことが知られている（西川ら 1985）。ただし，西部と東部での分布域の違いは顕著で，西部太平洋では北は日本列島南岸沿いから房総半島沖35°Ｎ付近まで，南はオーストラリア南東部沖37°Ｓ付近まで出現するが，東部太平洋では15°Ｎから５°Ｓの低緯度海域に限定される（Matsumoto *et al*. 1984）。カツオ仔魚の

出現する海域での表面水温は主に25℃以上とされ，この水温帯が南北方向に広く分布する西部太平洋では，東部太平洋に比べてカツオ仔魚の出現範囲が南北により広くなっている(Matsumoto *et al.* 1984, 上柳　1969)。カツオ仔魚の分布範囲は，季節的に南北方向に移動し，北半球の夏季には35°N 付近まで出現するが，冬季には22°N 付近が北限となる(上柳　1969)。したがって，カツオ仔魚は赤道を中心とした低緯度海域ほど年間の出現期間が長く，高緯度になるほど出現期間が短くなる傾向があり，日本近海やオーストラリア南東沖では，それぞれの海域の夏季にのみカツオ仔魚の出現が認められる。Wade（1951）は，1947年10月から1949年11月にフィリピン周辺海域で季節別仔稚魚採集を行った結果から，この海域でのカツオをはじめとしたマグロ類の産卵盛期は12月から2月にあると述べている。Nakamura and Matsumoto（1967）は，中央太平洋の南緯側赤道域にあるマーケサス諸島周辺での仔魚採集を行い，6－10月のデータ不足はあるものの南半球の夏にあたる1－4月にカツオ仔魚の出現量が多かったと報告している。

また，低緯度海域でのカツオ仔魚の分布密度には，東西間で違いがあることが報告されている。上柳（1969）は，0－10°N の北半球側赤道域において，東部から西部太平洋にかけて西方ほどカツオ仔魚の採集個体数が多く出現率も高い傾向にあることを示した。Matsumoto（1975）は，南半球側も含めて10°S－20°N の低緯度域でのカツオ仔魚の採集結果をまとめ，単位曳網あたりの採集個体数は中央部の160°E－140°W で最も多いことを示した。これらの報告によれば，太平洋におけるカツオ仔魚の主分布域は，140°W 以西の赤道を中心とした中・西部低緯度海域であると考えられる。

一方，カツオ仔魚の鉛直分布についても，これまでに幾つかの研究結果が報告されている。Strasburg（1960）は，ハワイ周辺からマーケサス諸島周辺に至る中部太平洋低緯度海域において，海面近くから水深200mの範囲内で5層に分けて昼夜別にカツオ・マグロ類仔魚採集を行った。それによると，カツオ仔魚が最も多く出現したのは0－60m層で，70m以深での採集量はそれ以浅に比べて明らかに少なかった。また，海面近くでは昼間はあまり採集されなかったが夜間には採集量が顕著に多くなったことから，カツオ仔魚が夜になると表面近くへ浮上する日周鉛直移動を行っていると考えられた。Higgins（1970）もハワイ周辺で2層（20m付近と100m付近）での朝・昼・夜の時間帯別採集を行い，カツオ仔稚魚の採集量が夜間には浅い層に多く昼間には深い層で多かったことから，カツオ仔稚魚の日周鉛直移動を支持した。彼は水深帯によって採集されたカツオ仔稚魚の体長組成が異なることにも着目し，カツオが生活史のごく初期段階には水温躍層よりも浅い水深に分布するが，成長に伴ってより深い水深帯にも分布するようになると考えた。カツオ仔魚の鉛直分布については，上柳（1969）も昼夜での水深帯別出現状況において Strasburg（1960）や Higgins（1970）と同様の結果を得ており，昼間は0－2m，20－30m，40－50mと水深とともに採集量が増大する一方，夜間には0－2mでも多くの仔魚が採集された。

また，仔魚期におけるカツオの鉛直分布の特徴として，同じ高度回遊性魚類に属するキハダ，メバチ，ビンナガ *Thunnus alalunga*，ミナミマグロといったマグロ属仔魚が昼間海面近くのごく浅い水深帯（20m以浅）に多く出現するのに対し，カツオは海面付近には出現せず，20mから60mのやや深い水深帯に多く分布することが報告されており（Boehlert and Mundy 1994, Davis *et al.* 1990, Strasburg 1960, 上柳　1969），近縁種間で生息する水深を棲み分けていることが解る。Boehlert and Mundy（1994）の調査における水温・塩分の鉛直分布をみると，カツオ仔魚の分布水深での水温範囲は22.0－27.2℃，塩分範囲は34.7－35.3‰であった。Strasburg（1960）によれば，カツオ仔魚は水温18.5℃以下でも採集された例があり，その出現最低水温は15.6℃であると推定した。これまでの結果から，カツオ仔魚は，主として表層混合層内に分布し，この厚さによりカツオ仔魚の分布水深が決まるものと考えられる。

さらに，島嶼部や珊瑚礁周辺などの沿岸域におけるカツオ・マグロ類仔魚の分布についても幾つかの研究例がある。カツオ・マグロ類の多くの種は，生活史の大半の期間を外洋表層域で過ごすと考えられ，産卵域も沿岸性の魚種に比べると広大な海域に及ぶため，それまでカツオ・マグロ類仔稚魚の分布調査もいわゆる外洋域が対象であった。Miller（1979）は，ハワイのマウイ，オアフ，カウアイ島の沿岸（距岸2km以内）で1972年5－6月に仔稚魚採集を行い，キハダ仔魚の高密度分布について報告した。Leis *et al.*（1991）は，1989年1－2月に中部太平洋仏領ポリネシアにおいて，珊瑚礁からわずか100－200m沖で仔魚採集を行い，過去に中部太平洋の外洋域で行われたカツオ・マグロ類仔魚の採集結果と比較した。それによると，カツオをはじめキハダ，ビンナガ，ソウダガツオ類においてそれまでの報告よりも高密度に分布していただけでなく，得られた仔魚の多くが体長2.6－3.5㎜であったことから，これらの種が珊瑚礁周辺で産卵しているものと推定した。一方，Boehlert and Mundy（1994）は，ハワイのオアフ島の東側と西側で合計6定点（距岸1.8－27.8km）での仔稚魚採集を行った結果として，

東西定線ともカツオ仔魚の採集量が岸側から沖側の調査点に向かって増加する傾向を示した。これらの結果は，カツオ親魚が外洋表層域を中心に，熱帯域では珊瑚礁周辺の比較的水深の浅い沿岸域でも産卵活動を行っていることを示している。

稚魚期から幼魚期における分布

前節でも述べたように，稚魚期から幼魚期にかけてのカツオの採集例は乏しいため，この時期の分布をはじめ，後述する食性や成長などの生態的知見は，仔魚や成魚に比べて少なく断片的である。この時期の分布域については，はえ縄漁業により漁獲された大型のマグロ・カジキ類の胃内容物からの出現状況をもとに推定された例がある。Yoshida（1971）は，中央太平洋におけるカツオ幼稚魚の分布について，カジキ類の胃容物としての出現状況に基づいて考察し，赤道付近から南半球での幼稚魚の分布域はそれまでに報告されている仔魚の分布域にほぼ一致するものと推定した。北半球における分布についても，ハワイ周辺での出現状況と Higgins（1967）の報告から，南半球と同様に幼稚魚の分布は仔魚期とほぼ同様と考えた。彼は季節的な相対密度の変化についても検討し，ハワイ周辺では８月に明瞭なピークを認め，南半球側（10－20°S）では11－２月に相対密度が高いことを示した。日本では，赤道域から南北40度以上に及ぶ広大な海域でのマグロはえ縄漁業の操業範囲を利用して，太平洋におけるカツオ幼稚魚の地理的分布についての研究がなされた（森　1972）。それによると，体長15cm未満のカツオ幼稚魚は西部から中部太平洋の赤道付近０－10°N を中心として，北半球側では薩南，小笠原，ハワイ西方海域からも出現しており，Yoshida（1971）と同様に幼稚魚の分布域が仔魚のものと類似していると報告した。西部太平洋の低緯度海域では，他の海域よりも分布密度が高く，夏季と冬季の季節的な違いは認められなかった。彼はまた，カツオの成長に伴う分布域の拡大についても考察し，稚魚期には仔魚期とほぼ同じ海域に分布するが，幼魚期のある段階（体長15cmから35cmの間）に達すると表面水温24℃以下の低水温海域にも出現するようになると推定した。飯塚ら(1989)は，竿釣りによって漁獲されたカツオの吐出物や浮き刺網による採集物としてのカツオ幼稚魚の出現状況から，西部太平洋熱帯域の広い範囲にわたって幼稚魚が分布することを示した。ところで，日本近海におけるカツオ未成魚の北上期の漁場表面水温がおおよそ20℃以上（二平　1996）であることから推察すると，表面水温から見た稚魚期から幼魚期におけるカツオの分布範囲は，仔魚期（25℃以上）と未成魚期（20℃以上）の間にあるものと考えられるが，詳しくは今後の調査を待たざるを得ない。

一方，稚魚期から幼魚期の鉛直分布については，前節で述べた如く直接採集法により調べた例がないためほとんどわかっていない。仔魚期の分布水深は主として20－60mであり，成魚では水深273mまで出現した例があることから（Dizon *et al*. 1978），水平分布と同様に成長に伴う遊泳能力の発達とともに分布水深もより深い範囲に及ぶと考えられるが，現段階ではいずれも推測の域を出ない。

摂 餌 生 態

カツオは外洋表層域の食物連鎖において，最も高次に位置する捕食者の１つに挙げられ，これまでの研究でも外洋表層域の高次捕食者としての観点から，食性や摂餌行動について多くの報告がなされている（Matsumoto *et al*. 1984）。また，カツオがどこで何をどのようにして食べているのか，といった摂餌生態を調べることは，前節で述べた分布および後節で述べる成長と密接に関わってくる重要な問題であり，これらを結びつけるいわば鍵的な役割をもつ知見と考えられる。本節では，これまでになされた研究をもとに生活史の各段階での摂餌生態について総括するとともに，高次捕食者であるカツオ・マグロ類の食性における特徴の１つとしてしばしば指摘される共食い現象についても紹介する。

各成長段階における食性と摂餌行動

カツオの摂餌生態についても，分布や成長と同様に未成魚や成魚に関する報告は多数見られるが，初期生活史段階の知見は乏しい。仔魚期の摂餌生態については，魚谷ら（1981），Young and Davis（1990）の報告があり，仔魚期から稚魚期のものでは青木(1999)，西川（1975）の報告が見られるのみである。魚谷ら（1981）は，インド洋でのミナミマグロの主産卵場として知られるオーストラリア北西沖で，口径２mの稚魚ネットにより採集されたカツオとマグロ属４種（ビンナガ，キハダ，メバチ，ミナミマグロ）およびソウダガツオ属仔魚の消化管内容物を調べ，それぞれの食性の違いを明らかにした。これら仔魚は体長３－８㎜の個体が全体の80%以上を占めていたが，カツオとマグロ属では消化管内容物組成に明らかな違いが認められた。カツオとソウダガツオ属仔魚は主として尾虫類と枝角類の *Evadne* 属を食べていたのに対し，マグロ属４種はカイアシ類の *Corycaeus* 属を中心に摂餌していた。また，それぞれの消化管内容物の体長を測定したところ，マグロ類は体長0.21－0.80㎜の餌生物が主体だったのに対し，カツオとソウダガツオ類は0.81㎜

以上の餌生物を多く捕食していた。南西諸島周辺で採集されたクロマグロ *Thunnus thynnus* 仔魚の食性を調べた魚谷ら（1990）によれば，本種仔魚の胃内容物は，全長5㎜以下ではカイアシ類のノープリウス幼生，全長5㎜以上では *Corycaeus* 属が主体であり，北西オーストラリア沖のビンナガ，キハダ，メバチ，ミナミマグロと類似していた。これらのことから，彼らはマグロ属5種がいずれも仔魚期において小型カイアシ類を主要な餌生物として利用するものと考えた。Young and Davis（1990）もオーストラリア北西沖でカツオ・マグロ類仔稚魚を採集し，カツオ，ビンナガ，ミナミマグロの摂餌生態について報告した。彼らの調べた標本も，ほとんどが体長3－8.5㎜の後期仔魚であった。消化管から出現した主な餌生物は，カツオが尾虫類と魚類仔魚であったのに対し，マグロ属2種ではカイアシ類のノープリウス幼生や *Corycaeus* 属および *Farranula* 属が多かった。彼らの結果によると，体長5.5㎜以上のカツオ仔魚では既に魚食性が目立ち始めているのに対し，ミナミマグロでは体長8㎜台以降で魚食性が認められた。カツオ仔魚の魚食性の発現時期が他のマグロ属仔魚より早いことは，前述の魚谷ら（1981）の報告からも推察される。このことについて，Tanaka *et al*.（1996）は仔魚期から稚魚期への成長過程において，消化器官が成魚型に移行する時期がカツオの方がマグロ属より早いことを示した。西川（1975）によれば，カツオの後期仔魚から稚魚期への移行にともなう消化器官の形態変化として，腹腔の後方への拡大とそれにともなう胃盲嚢，腸管の伸長が起こる。それとともに，カツオの食性においても魚類仔魚の出現率が著しく高くなり，より大型の餌生物を捕食するように変化する。青木（1999）は，マリアナ諸島からカロリン諸島周辺にかけて採集された仔稚魚の胃内容物調査を行い，仔魚期から稚魚期にかけての各部の相対成長と餌生物との関係について調べ，口部の発達，いわゆる巨顎化（代田　1970，1978）と幽門垂の伸長が仔魚期における魚食性の発現に対応していることを示した。また，カツオ稚魚の餌生物としては魚類仔魚を中心として甲殻類と頭足類が出現し，魚類以外の胃内容物組成はカツオ稚魚の分布域によって変化していた。

カツオ・マグロ類仔稚魚の摂餌活動の日周性については，カツオ（西川　1975），ビンナガ，ミナミマグロ（Young and Davis 1990），キハダ（上柳ら　1973），クロマグロ（魚谷ら　1990），およびソウダガツオ類（Strasburg　1959）での空胃率や胃内容物量の日周変化が報告されている。これらの結果をまとめると，カツオ・マグロ類の仔稚魚は，昼間摂餌活動を行い，夜間には摂餌しない視覚捕食者であることが解る。

一方，未成魚や成魚の摂餌生態については，太平洋を中心として数多くの報告がなされている（Alverson 1963, Batts 1972, Dragovich 1970, 1971, Dragovich and Potthoff 1972, 堀田・小川　1955，飯塚ら　1989, Nakamura 1965, Roger 1994, Waldron and King 1963）。Matsumoto *et al*.（1984）は，カツオの食性に関する既存の知見を整理した結果，カツオの餌生物として80科以上の魚類と11目の無脊椎動物が出現したと報告している。これらを総合すると，魚類，甲殻類，軟体類がカツオにとっての主要餌生物である。これらの餌生物のうち，多くの海域において魚類の出現率がもっとも高い傾向にあったが，海域によっては甲殻類または頭足類の出現率がもっとも高く，カツオの餌生物組成が棲息海域によって異なることをうかがわせている。また，カツオ成魚の餌生物としての魚類に対する依存度は，キハダやメバチなど他のマグロ類に比べて低いとされている（落合・田中　1998）。成魚の摂餌時刻については，朝と夕方に活発に行われるとされ（Dragovich 1971, Nakamura 1965, Waldron and King 1963），夜間には摂餌しない。このような朝夕の摂餌活動のピークは，餌生物となる小型魚類や動物プランクトンがカツオの遊泳層である表層近くに浮上する日周鉛直移動に関係していると考えられている（Nakamura　1965）。カツオの摂餌量と消化時間について水槽実験により研究した Magnuson（1969）によれば，尾叉長39－50cm，水温23.3－25.7℃の条件下での1回あたりの最大摂餌量は体重の7％，1日あたりでは体重の15％で，消化速度については，給餌から12時間後には胃内の餌は消化され空胃になった。

捕食者と共食い現象

カツオの捕食者としては，カツオ自身による共食いをはじめ，同じ高度回遊性魚類に属するマグロ類，カジキ類がよく知られており（青木　1999, Dragovich 1970, 1971, Dragovich and Potthoff　1972, Eckles 1949, 堀田　1953, 堀田・小川　1955, 飯塚ら　1989, King and Ikehara 1956, 岸上　1926, Marr　1948, Matsumoto　1961, 森　1972, Nakamura 1965, 須田　1953, Yoshida 1971），この他にもウシサワラ *Scomberomorus sinensis*，カマスサワラ *Acanthocybium solandri*，サメ類，海鳥類などが挙げられる（Matsumoto *et al*. 1984）。森（1972）によれば，マグロ類5種とカジキ類10種により捕食されたカツオの体長範囲は3cmから70cm以上に及んでいたが，量的に最も多く捕食されていたのは体長6－20cmの幼稚魚であった。他の報告においても，捕食されるカツオの多くは体長20cm以下の幼稚魚であり，この時期のカツオがマグロ類やカジキ類にとって捕食されやすい大きさであるとともに，分

布域が重なることによって彼らの餌としての役割を果たしていることになる。体長30cm以上のカツオになると大型のカジキ類などによる捕食以外あまり胃内容物として出現しなくなるため，被食による減耗は少ないと考えられる。また，カツオにおいて大型個体による小型個体への共食いが比較的よく起こる現象であることは，本種の生活史における生態的な意義だけでなく，カツオ資源全体の維持を考える上で興味深い（飯塚ら 1989）。カツオ幼稚魚の共食いによる被食量については，成魚と幼稚魚それぞれの魚群の時空間的な重なり具合，つまり両者の遭遇確率がどれだけあり，さらに他の餌生物量との関係も影響すると推察される。これまでの報告の中で最も高い出現率を示した例としては，胃内容物を調べた成魚603個体中24－44%もの個体が幼稚魚を捕食していたという例がある（Nakamura 1965）。しかしながら，幼稚魚の共食いによる減耗が全死亡率のどれだけの割合を占め，資源への加入量にどれだけの影響を与えるか，といった定量的な研究を行った例は報告されていない。一方で共食いに於いては，餌料の捕食者への転換効率が著しく高いことも，貧栄養海域におけるカツオの摂餌戦略の１つとして注目に値する。現在までの知見で言えることは，本種の主要な産卵場である中西部太平洋低緯度海域では常に発生時期の異なる（体長組成を異にする）群が幾つも存在し，それらがしばしば遭遇することにより種内での捕食・被食関係が成り立っているという事実のみである。

初 期 成 長

カツオの成長については，これまでに耳石をはじめとした年齢形質法（相川 1937，相川・加藤 1938，Batts 1972，Chi and Yang 1973，Sosa-Nishizaki *et al*. 1989，Radtke 1983，Shabotiniets 1968，Uchiyama and Struhsaker 1981，Wild *et al*. 1995，Wild and Foreman 1980）や標識放流・再捕法（Bayliff 1988，Joseph and Calkins 1969，Josse *et al*. 1979，Sibert *et al*. 1983），体長組成法（Chi and Yang 1973，Joseph and Calkins 1969，川崎 1965，二平 1996，田中 1989，Yao 1981，横田ら 1961，Yoshida 1971）により多くの報告がなされている。Matsumoto *et al*.（1984）は，これらの報告を海域と解析手法により整理し，それぞれの成長式による年齢と体長との対応表にまとめて示した。しかしながら，これまでの報告のほとんどは，主に未成魚期から成魚期における成長を解析することにより生活史全体の成長式を導き出しており，初期生活史段階における成長を明らかにした例はほとんど見られない。したがって，本節では生活史全体を通してのカツオの成長に関するこれまでの研究例を中心に総括するとともに，稚魚期までの初期成長についても言及する。

カツオの年齢と成長

カツオの成長についての最初の報告は，相川（1937）による脊椎骨での年齢査定に基づくものと考えられる。彼は沖縄周辺から伊豆・小笠原海域，さらに東北沖に至る本邦太平洋側各海域から採集したカツオ（体長30－80cm）の脊椎骨から年輪を読み取り，これらをもとに年齢と体長との関係を求めた。それによると，満１歳時の体長は26cm，満２才で34cm，満３才で43cm，満４才で54cmに成長すると考えられた。相川・加藤（1938）は，パラオ海域で採集されたカツオについても同様な方法で年齢査定を行い，満４才までの成長については日本近海の群とほぼ同じ成長をするものと推定した。1960年代から1980年代にかけて，カツオの年齢と成長に関する研究は数多く報告されている。横田ら（1961）は，捕食者の胃内容物から出現したカツオ幼魚の地理的，季節的出現状況と体長組成から，日本近海に来遊するカツオが西部太平洋の低緯度海域（スルー海から薩南）で11月から５月に発生したものと推定した。それとともに，枕崎をはじめとして各漁港に水揚げされた漁獲物の体長組成データを加えてカツオの年齢と成長について検討した結果，満１歳時の体長は37cm，満４才では73－76cmと相川の報告よりもかなり速い成長を示した。川崎（1965）も日本周辺に来遊するカツオの体長組成と須田（1953）のマグロ・カジキ類の胃内容物としてのカツオ幼稚魚の出現状況をもとに，年齢と体長との関係を調べた。その結果，夏を基準として，１歳で15cm，２歳で45cm，３歳で63cm，４歳で73cm，５歳で77cmに達するものと推定した。体長組成法によるカツオの成長に関する報告は，日本ではその後も Yao（1981）が川崎（1965）と同じく日本周辺４海域（南西諸島周辺，伊豆・小笠原海域，五島列島周辺，東北海域）で漁獲されたカツオの体長組成を解析することにより，日本近海に来遊するカツオの成長式を推定した。田中（1989）は，海外まき網漁業の漁獲物から月別の体長組成を整理し，そのモードの追跡によって西部太平洋熱帯海域（いわゆる南方海域）におけるカツオの年齢と成長との関係を推定した。満１歳および満４歳での体長は，Yao（1981）によれば26cmと68cm，田中（1989）によれば27cmと62cmであった。東部太平洋のカツオについては，Joseph and Calkins（1969）が，中部太平洋ハワイ周辺では Yoshida（1971）がそれぞれ体長組成法による成長の推定を行った（Matsumoto *et al*. 1984）。近年では，二平（1996）が東北海域への来遊群について５つの体長グループを

想定し，標識放流・再捕結果と長年にわたる体長モードの追跡から，各グループの移動と成長について考察した。

一方，年齢形質法による成長解析では，前述の相川（1937），相川・加藤（1938）の脊椎骨を用いた年齢査定以降，耳石日輪(Uchiyama and Struhsaker 1981, Wild and Foreman 1980, Wild *et al*. 1995）や第2背鰭棘（Sosa-Nishizaki *et al*. 1989）を用いた成長推定が行われた。Uchiyama and Struhsaker（1981）は，カツオの耳石（扁平石）から日輪の計測を行い，中部太平洋と東部太平洋における成長を von Bertalanffy の成長式に当てはめた。彼は尾叉長3－80cmでの成長速度について，27cmまでは1.6mm d^{-1}，27－71.4cmの間は0.8mm d^{-1}，71.4－80.3cmの間は0.3mm d^{-1}と推定し，東部太平洋では中部太平洋よりも成長速度が遅いと考えた。彼らの示した中部太平洋でのカツオの成長は，これまでのすべての手法を含めた報告の中で最も速く，満1歳で44cm，満2歳で68cm，満3歳で83cm，満4歳では91cmに達する。Wild *et al*.（1995）は，東部太平洋でのカツオの成長について，テトラサイクリンを使った耳石標識･放流と再捕時の体長測定･輪紋計測から輪紋形成周期を調べた。Uchiyama and Struhsaker（1981）は，ハワイでの飼育実験によりカツオの耳石に日周輪が形成されると報告したのに対し，Wild *et al*.（1995）では輪紋数と放流期間（日数）が1対1で対応しない傾向が示された。その原因として，彼らは光学顕微鏡下での輪紋の見えにくさによる計測誤差，生殖活動に伴う輪紋形成の停滞，耳石の観察部位による影響があったのではないかと考えた。

さらに，標識放流・再捕法によって，放流期間中の成長速度をもとに成長式を推定したハワイ近海（Joseph and Calkins 1969），東部太平洋（Bayliff 1988），中・西部太平洋低緯度海域(Josse *et al*. 1979, Sibert *et al*. 1983）の報告がある。この方法では，標識装着による魚体への影響を考慮する必要があるものの，放流時と再捕時の体長差により放流期間中の成長を直接知ることができる点で他の方法にはない長所がある。ただし，この方法でも標識を装着できる魚体の大きさがある程度以上でなければならず，現状では体長30cm未満の魚体に標識をつけることは技術的にかなり難しい。上述の研究例においても，標識を装着した魚体の大きさはほとんどが体長40cm以上の未成魚から成魚に属するものであった。Joseph and Calkins（1969）は，438個体分の標識放流・再捕データの解析から，2通りの von Bertalanffy 型成長式を導き出した。それによると，満1歳時の体長は31cmまたは41cm，4歳時では70cmまたは73cmであった。Bayliff（1988）も同様にして von Bertalanffy 型の成長式を求め，東部太平洋でのカツオの成長について K 値を0.658，極限体長を88.5cmと推定し，放流時体長43－57cm，標識放流期間30－90日の361個体から計算した成長速度は0.6mm d^{-1}であった。

以上のように，これまでのカツオの成長に関する報告をまとめてみると，それぞれの成長式でかなり差があることがわかるが，これらは大きく分けて日本側（西部太平洋）とアメリカ側（中・東部太平洋）の2通りの成長に集約される。すなわち，満1歳時で30cm以下の遅い成長（日本）なのか，あるいは40cm以上に達する速い成長（アメリカ）なのかという点である。これらの成長差を棲息海域の違いによって説明するには，あまりにも差が大きすぎるように思われる。このことについて，落合・田中（1998）は，成長解析に用いたそれぞれの手法の違いがもたらしたものではないかと考えた。これまでの報告をまとめてみると，年齢形質法の中でも耳石日輪解析法では年齢を小さく見積もる傾向がある一方，脊椎骨や背鰭棘では年齢を大きく見積もる傾向が認められる。Josse *et al*.（1979）は，これまでの成長解析手法の中でもっとも信頼性が高いのは標識放流・再捕法であり，2番目に信頼性が高いのは耳石日輪解析法であると述べている。これらの結果を考慮すると，カツオは遅くとも満3年で成熟して産卵を開始し，その前段階として日本近海をはじめとした中緯度海域に索餌回遊して急速な成長を遂げる時期は満1歳または2歳である。したがって，カツオの成長についてはとくに初期成長を含む若齢期の成長速度を明らかにすることが重要である。

初期成長

上述の如くカツオの成長については多くの報告がみられる一方，本種の初期成長に関する報告は，これまでわずかに3例が見られるのみである。Radtke(1983）は，ハワイ沿岸で漁獲されたカツオ成魚から得た受精卵をふ化させ，5日間仔魚の飼育を行うことにより扁平石の輪紋観察を行った。それによると，カツオのふ化仔魚の全長は平均3.35mmで，その後の5日間にわたり扁平石に1日1本ずつの日周輪が形成されることを確認した。カツオでは，後期仔魚期以降の飼育による成長の解明については，残念ながらこれまでに研究された例がみられない。上柳ら（1974）も人工授精卵からカツオのふ化飼育を試み，卵内発生とふ化後の仔魚の形態変化について記載したが，ふ化後5日目で飼育試験を終えている。幼稚魚期の成長について言及した2例は，いずれも胃内容物として得られた標本の耳石日輪解析法（Uchiyama and Struhsaker 1981）または体長組成法（Yoshida 1971）によりハワイ周辺海域での成長を推定したものである。耳石日輪解析法に

よる成長解析結果では，日輪計測した体長20cm未満の幼稚魚標本が11個体と少ない点に注意が必要ではあるが，ふ化後３ヶ月で体長14cmに達し，満１年では44cmになるものと推定された。一方，体長組成法では，ふ化後１ヶ月で体長９cmになり，その後の11ヶ月間では月２cmの速度で成長し，その結果満１年での体長は31cmに達すると推定した。ただし,5年間にわたって体長組成モードを解析した結果から，満１才までの１ヶ月あたりの成長速度は1.2－２cmと年による違いが見られた。

以上のように，カツオの初期成長についてはきわめて知見が少なく，1980年代後半以降は報告がない。本種の初期成長に関する知見が不足していることの要因としては，本種は現在までの技術では飼育が困難であり，親魚の養成および採卵からのふ化飼育による実験的な検討ができなかったことに加え，第２節で述べた如く天然域での広大な産卵場と長期にわたる産卵期間によりあらゆる体長の魚群が至る所で同時に存在し，特定の発生群の移動・回遊および成長といった生活史を追跡することが難しいことが挙げられる。このような現状を考慮して，本研究では近年多くの魚種で取り入れられている耳石日輪解析法を使ってカツオの日齢査定を行い,初期成長を明らかにすることを試みた(第５章)。

発育段階の区分

本研究で取り扱うカツオは，幾つかの発育段階の個体を含んでおり，以後の混乱を避けるためにこれまでの知見に基づいてここで定義付けを行うこととする。本研究の対象としたカツオの大きさは，主として体長10㎜前後から200㎜までである。落合・田中（1998）によれば，カツオは全長12㎜前後で背鰭と臀鰭の鰭条数が定数に達し，稚魚期に入るとされている。稚魚期の終わりおよび幼魚期の始まりについては，森（1972）は満１歳に達する体長として，それまでの研究者が示した満１歳時の体長のうちで最も小さい15cmを境界とした。一方，青木（1999）によればカツオの鰓耙数は体長100㎜を越えると定数に達するとしており，カツオの特徴である紡錘型の体型と背部の色を含めて形態学的に判断すると幼魚期の始まりは体長100㎜前後とするのが適切と考えられる。したがって，本研究ではカツオの発育段階について，仔魚，稚魚については岩井（1988）の魚類の発育段階区分をもとに，幼魚については形態および生態学的特徴をもとに以下のように区分した。

前期仔魚：ふ化後から卵黄吸収が終わるまでの段階

後期仔魚：卵黄吸収後から各鰭の条数が定数に達するまでの段階

稚魚：鰭条数が定数に達し，体側背部の暗色化と腹部の銀白色化，第１背鰭，第２背鰭，小離鰭の形状など，体の各部の特徴が発現初期にある段階

幼魚：鰓耙数が定数に達し，全ての鰭の形状，尾鰭隆起縁を備えた尾柄部など体の各部の特徴が発現するとともに，紡錘型の体型など種の形態的特徴が現れてくる。成長が盛んで，遊泳能力の発達とともに行動範囲を拡大していく段階

先にも述べたように，カツオの初期生態研究は標本採集の困難性からこれまで仔魚期までを対象とした研究がほとんどで，稚魚期以降についての知見は極めて乏しく，このことが発育段階の定義付けに関しても曖昧なままになっている原因と考えられる。本研究では，上述の根拠に従って，体長10㎜前後までを仔魚，体長100㎜までを稚魚，体長100㎜以上を幼魚として区分することとする。

第２章　新たな幼稚魚採集法の確立

カツオは，外洋表層域での長距離回遊を行うための卓越した遊泳能力を備えており，その発達は生まれてから成長とともに急激に進行する。本種の遊泳能力の高さは，紡錘型の体型をはじめとして，隆起縁の発達した強靱な尾柄部，遊泳時の海水抵抗を低下させるために退化した魚鱗及び収納可能な第１背鰭を見ても伺い知ることができる（岩井　1985）。カツオ漁業では，本種の遊泳行動を巧みに利用することで漁獲量の増加に結びつけようとする工夫がなされてきた。そのため，漁獲対象となった生活史段階以降のカツオの生態研究においては,漁業からの漁獲情報が有効な手段となる。これに対して，漁獲対象となる前の生活史段階，特に稚魚期から幼魚期においては，漁業によって発達してきた漁獲技術をそのまま使用して採集することが困難なだけでなく，一般の卵・仔魚期の生態研究で広く普及している小型ネット類でもほとんど不可能であった。稚魚期から幼魚期のカツオは，最も自然死亡率の高い卵から仔魚期の初期減耗を乗り越え，急速に遊泳能力を発達させながら外洋での行動範囲を拡大していくものと考えられる。

一方，稚魚期から幼魚期におけるカツオの生態を明らかにすることは，このあとに起こる漁業資源への加入のメカニズムや日本近海への来遊時期と来遊量予測のための基礎知見といった水産資源学的見地から重要な意味を持つ。そのためには，これまで不可能とされてきたカツオ幼稚魚に対する効果的な採集方法を確立

することが必要不可欠の条件となる。本研究では，まず現在利用することができる漁具の中から，どれがカツオ幼稚魚の採集において最も効果的であるか検討し，ついでその漁具を用いてカツオ幼稚魚採集法の開発に取り組んだ。また，この採集法の確立により，カツオのみならずマグロ類やサケ・マス類など他の外洋性大型浮魚類の幼稚魚採集にも道が開かれるものと考えた。1992年から5年間にわたり西部太平洋熱帯海域を調査海域として，カツオ幼稚魚採集用中層トロール網 TANSYU による採集を行った結果，これまでの採集法では得られなかった体長範囲のカツオを1時間曳網あたり1000個体単位で採集することが可能になった。この採集法の開発により，これまで知見の乏しかったカツオの稚魚期から幼魚期にかけての生態研究は，新たな展開方向を見出すことができたと考える。以下にその概要を記す。

材料および方法

採集漁具の検討

1991年度当初からカツオ幼稚魚の新たな採集法を確立するために，どの漁具が最もカツオ幼稚魚の採集に有効であるか，という点から研究を開始した。現在の漁具は多種多様で，それぞれ対象生物を捕らえるための工夫がなされて進歩してきたが，本研究で候補としたのは，カツオ漁業で広く使用されている釣り漁具類やまき網，浮き刺網のほか，マアジやスケトウダラ漁業で使われる中層トロール網，過去のカツオ稚魚採集で用いられた集魚灯と敷き網であった。信頼性の高い採集結果の得られる漁具を用いることは，本研究の主目的であるカツオ幼稚魚の生態解明にとっての根本的な課題であるが，研究史で述べたようにこの時期の知見は著しく不足しているため，漁具設計の基礎情報として必要な対象魚の分布や遊泳行動については，カツオだけでなくマグロ類やマアジ，マイワシなどの小型浮魚類の生態に関する知見（落合・田中　1998）と漁業関係者からの聞き取り調査結果も参考にした。各漁具の漁獲特性についても，漁業関係者や漁具・漁法の専門家からの聞き取り調査に基づいて，それぞれの特徴を把握しながらカツオ幼稚魚に対して効果的な採集漁具になり得るかどうか検討した。

まず釣り漁具について，現在カツオ漁業では竿釣りと曳き縄が全国的に広く用いられているが，沖縄から静岡県にかけての黒潮流路沿いの海域で夏季を中心として出現しこれら漁業で散発的に漁獲されるカツオ幼魚の大きさは，最も小さいものでも体長20cm以上である（沖縄水試，高知水試，和歌山水試，静岡水試　私信）。したがって，本研究の採集対象とした体長20cm以下のカツオに対しては，現在一般的に用いられているカツオ釣り漁具の利用は困難であると判断した。ついでまき網については，現在低緯度海域を中心として操業する海外まき網漁船で漁獲されるカツオの体長は主として30cm以上で，30cm以下の幼魚が漁獲されることは少ない（田中　1989）。まき網により幼魚を採集するには，一般の漁船で用いられているよりもかなり網目を小さくする必要が生じるとともに，対象とする幼稚魚が表層である程度の群を形成していてその分布位置が確認できなければ操業することが困難である。大型竿釣り船の乗組員の中には，低緯度海域においてカツオ幼魚が群をなして遊泳するのを見たことがあると証言する者もいたが，記録として残された情報がないため，幼魚群が一般的に昼間ごく表層を遊泳しているかどうか現在の知見では不明である。また浮き刺網についても，漁業で漁獲されるカツオは大型魚であるとともに，東北区水産研究所により行われた1984－1986年のカツオ幼魚調査においても，充分な採集結果が得られていない（飯塚　1985，永沼・浅野　1987）。浮き刺網は，海面付近に漂流させて使用するため漁獲可能な深度は海面からせいぜい15m 程度であるが，研究史で述べたようにカツオの初期生活史段階における分布水深はこれよりも深い（Higgins　1970）。これらのことから，浮き刺網についてもカツオ幼稚魚の効果的な採集は難しいと判断した。集魚灯採集についても，これまでの例では有効な採集法となっていないとともに，根本的な問題としてカツオに集光性があるとする報告はないことが挙げられる。

これらに対し，中層トロールの利点としては，表層から中層に至るまであらゆる水深層で採集活動を行うことができ，カツオ幼稚魚の遊泳能力を上回る漁獲性能があれば他の漁具よりも有効な採集法に成り得ると考えられた。研究史で述べた如く過去に用いられた中層トロール網では，いずれもカツオ幼稚魚の効果的な採集には至らなかったが（Higgins　1970，King　and Iversen 1962，Matsumoto 1961，宅野・上柳　1978），その原因としてこれらの網は規模が小さく彼らの遊泳能力を上回っていなかったことが考えられる。したがって，カツオ幼稚魚の遊泳能力を把握し，これを上回る採集能力を備えた大型中層トロール網を開発することができれば，カツオ幼稚魚の効率的な採集が可能になると考えられる。以上の検討結果を踏まえて，本研究では大規模な中層トロール網を用いて，カツオ幼稚魚の新たな採集法を開発することを目指した。

カツオ幼稚魚採集用中層トロールの設計概念と仕様

カツオ幼稚魚の効果的な採集方法を確立するために，新たに中層トロール網 TANSYU の設計，製作に

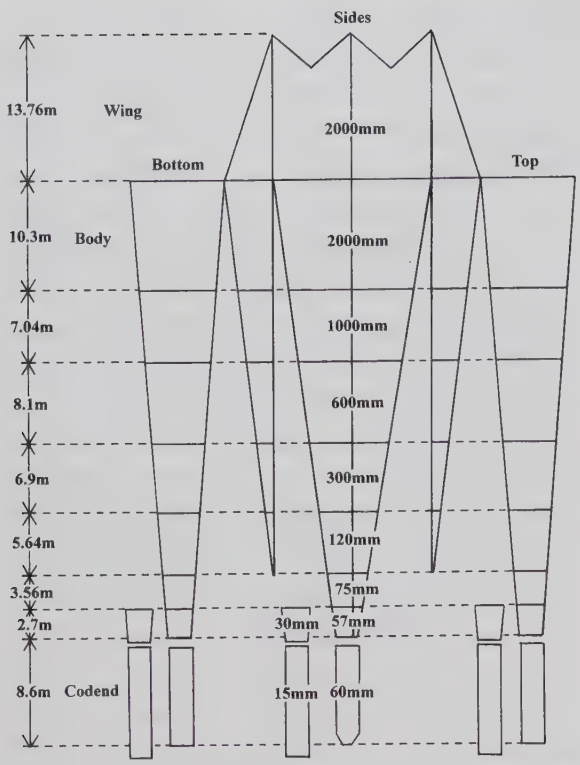


Fig. 2-1a. A shematic diagram of the midwater trawl net TANSYU-1 that was developed for collecting juvenile and young skipjack.

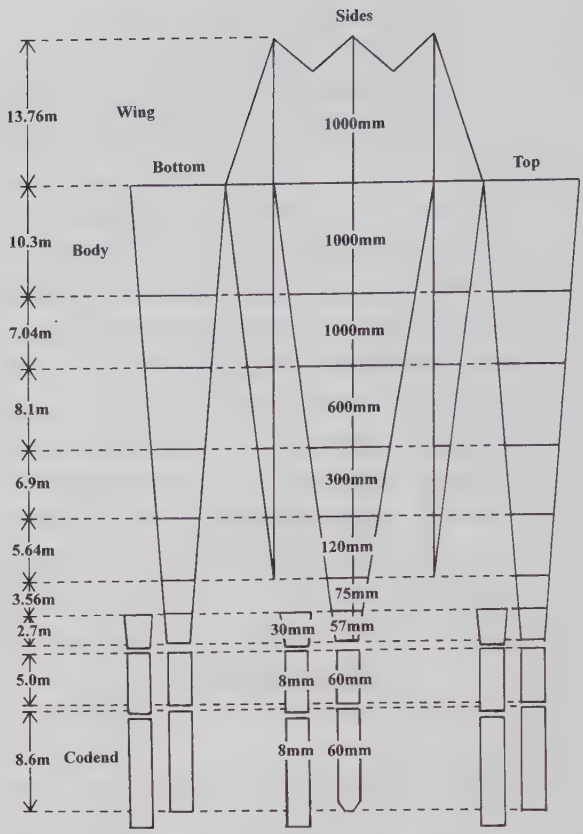


Fig. 2-1b. A shematic diagram of the improved midwater trawl net TANSYU-2.

取り組んだ。TANSYU の設計にあたっては，カツオ幼稚魚の高度な遊泳能力に対処することを念頭に据え，大規模な開口部と高速曳網が可能であることを最も基本的な設計概念とした。TANSYU が採集対象としたカツオ幼稚魚の体長範囲は，研究史で述べたこれまでの漁具では効果的な採集ができなかった10－200㎜とした。網の設計と調査時の運用に関する事前情報として，西海区水産研究所の漁業調査船陽光丸で使用されている中層トロール網 Yoko-2型によるマイワシ親魚の資源量調査（Takeshita *et al*. 1988）と，海洋水産資源開発センターが実施した大型トロール船によるチリ沖でのマアジ資源調査（海洋水産資源開発センター 1989）を参考にした。

本研究で使用する網の大きさや目合，調査時の曳網速度などの仕様については，1992年度からの調査航海で使用した調査船のワープウィンチの曳網能力と船尾部甲板の広さを考慮しながら，TANSYU-1型の設計図を作成した（図２－１a)。カツオ・マグロ類の遊泳速度に関する Magnuson（1978）の報告を参考にして，本研究での採集目標であるカツオの最大体長（200㎜）における瞬間的最大遊泳速度を約４ノットと想定した結果，TANSYU-1型の最大曳網速度はこれを十分に上回る５ノットとして設計した。開口部の大きさは採集量の多寡に関係すると考えられるが，投･揚網時の取り扱いを考慮して高さおよび幅を約20mに設定した。

これらの条件に基づいて設計したところ，TANSYU-１型の全長は66.6m，ヘッドロープとグランドロープの長さはそれぞれ38.6mとなった。身網部分の目合は，袖網および１段目が2000㎜で最後部７段目の57㎜まで段階的に小さくした。コッドエンド部は，全長13.6m，目合60㎜とした。身網７段目とコッドエンド部には，小型稚魚の網目からの逸出を防止するために目合30㎜と15㎜の内張り網を取り付けた。網の構成素材となるトワインの直径は1.91－5.06㎜で，各トワインの原糸はすべて太さ380デニールのポリエチレン製とした。

以上がカツオ幼稚魚採集用中層トロール網 TANSYU-1型本体（主漁具）の仕様であるが，これを曳網するための副漁具類として，袖網の先端からの曳索にあたるペンネント類，網口を水平方向に開かせるための開口板（オッターボード），開口板をワープから切り離すためのハンドロープが必要であり，これらを調査船からの曳索であるワープに取り付けて使用した。オッターボードの大きさは縦1.7m×横2.8mで，但州丸が他の調査で使用しているものをそのまま転用した。1993年には，改良を加えた TANSYU-2型（図２－１b）を製作した。

TANSYU-1型の製作にあたっては，事前に株式会社ニチモウ下関営業所（山口県下関市）において模型を使った水槽実験を実施し，曳網時の網形や漁具抵抗

を観測した。

調査海域，時期および調査船

1992年度より5年間の予定で，毎年10月中旬から12月上旬にかけて中層トロールを主体としたカツオ幼稚魚の採集航海を実施し，新たな採集法の確立を目指した。調査海域の選定にあたっては，第1に北半球の秋冬期においてカツオ幼稚魚が高密度に生息すると考えられる海域であること，第2にカツオ幼稚魚の採集活動が自由に行える海域であること，第3に予定された航海日数の範囲内においてできる限り多くの調査日数を確保するために日本から遠すぎないこと，を条件とした。第1の点については，研究史で述べたように低緯度海域ほどカツオ仔稚魚の年間を通じての出現期間が長いことから，赤道近くの熱帯域では幼稚魚も周年にわたって生息すると考えられることと(森　1972)，太平洋におけるカツオ仔稚魚の分布密度の東西間での偏りから，西部ほど幼稚魚も多く生息すると考えられることにより（上柳　1969)，西部太平洋熱帯海域が本研究の調査海域として適当であると判断した。第2の点については，カツオ仔稚魚の分布域がきわめて広大な海域にわたることから（西川ら　1985)，日本の200海里経済水域および公海域だけでは幼稚魚の分布を把握することは困難であり，他国の200海里経済水域への入域が必要と考えられた。そこで，当該海域の国際機関であるSouth Pacific Commission（南太平洋委員会，略称SPC）の協力のもとで入域申請を行ったところ，パラオ共和国およびミクロネシア連邦共和国より入域許可を与えられた。第3の点については，上記2点を満たす海域において問題とはならないと判断した。以上の点を考慮に入れて検討した結果，図2－2に示す調査海域が本研究の対象となった。

調査船については，大規模な中層トロール網を曳網することができる設備を有することを第1条件として検討した結果，兵庫県立香住高等学校の漁業実習船但州丸（444トン）を調査船とすることとなり，但州丸が代船建造となる1994年度以降には山口県立水産高等学校の青海丸（403トン）により調査を実施することとした。

採集方法

1）中層トロール

最初の2年間の調査（1992年度および1993年度）では，まずカツオ幼稚魚がどこでどのように生息しているのか把握するために，できる限り広い範囲で採集を行うよう曳網計画を立てた。調査海域の海洋物理学的環境の特徴として，北赤道海流と北赤道反流が南北に位置し，北赤道海流は東から西に向かい，北赤道反流は西から東に向かって流れている。これらの海流ごとにカツオ幼稚魚の分布と海洋環境との関係を明らかにするために，観測定線は南北方向を基本として設定した。観測定線上を航行しながら，魚群探知機とソナーによるカツオ幼稚魚の探索を行って魚群に対して中層トロールを投網するとともに，発見できなかった場合に備えて定時的に200m以浅での1時間水平曳きを行うこととした。本研究では，中層トロールの曳網時間を投網開始後トロール網開口部が所定の水深層に達した時刻からワープの巻き上げを始める揚網開始時刻までの間と定義し，原則として1回の曳網時間を1時間とした。曳網時における網口の水深と高さは，漁網監視装置（Furuno FNR-200）により常時観測し，目的の深度を維持することとした。

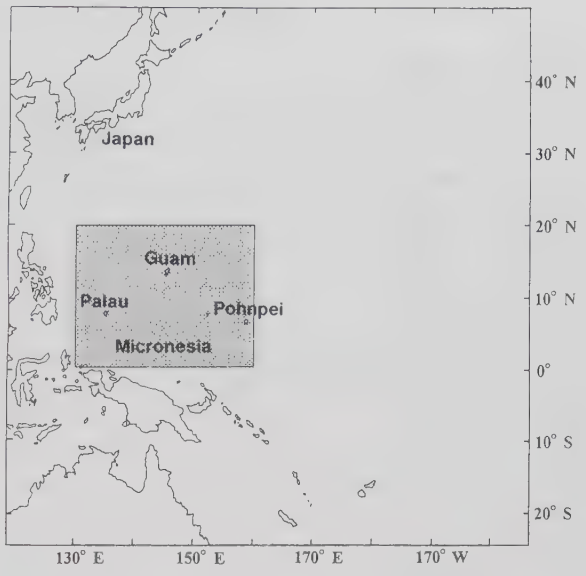


Fig. 2-2. The sampling area (0－20°N, 130－160°E).

Higgins（1970）の報告から，遊泳能力の高いカツオ幼稚魚を捕獲するには彼らの視覚が機能する昼間よりも夜間の方が有利と考えられたため，曳網は夜間を中心に行うこととしたが，日周的な採集データを得る目的で昼間の曳網も実施した。曳網水深については，研究史で述べた如くカツオ幼稚魚の生息水深層に関する知見が全くないため，仔魚と成魚の分布水深に関する知見から推測し(Dizon *et al.* 1978, Strasburg 1960, 上柳　1969)，基本的には表層から水深200mの範囲内に生息するものと仮定した。したがって，TANSYU型中層トロールの網口の高さにより，基本的な曳網水深層は0－200mの間の10層となった。目的とする曳網水深にトロール網を位置させるには，主としてワープの長さを調節することで対応した。また，曳網速度の違いによるトロール網の漁獲特性を調べるために，速度を変えての曳網試験も行い採集データを分析した。

2）その他の漁具

中層トロール網以外の漁具については，浮き刺網，曳き縄および釣り竿と擬似針，たも網を用意し，中層トロールの補完的な採集活動としての使用を考えた。このうち曳き縄は航走中に使用できるため，夜明け後から昼までの調査点間の移動中に随時使用することとした。釣り具類はカツオが漂流物の下に付く性質を考慮して，航走中に海面上の流れ物を探索し，魚探反応により魚群の存在を確認した場合に随時停船して漁獲を試みることとした。たも網は夜間停船して海洋観測を行う際に，調査船の近くに遊泳してきたカツオ幼稚魚がいた場合に捕獲を試みることとした。浮き刺網は前回東北区水産研究所が実施したカツオ幼魚調査で使用したものを用意し(飯塚　1985，永沼･浅野　1987)，中層トロールの補完的な漁具として夜間停船中に場合によっては使用することとした。

標本の取り扱い

中層トロールの揚網後コッドエンド部から取り出したサンプルは，まず全体の湿重量を測定し，つづいて各動物群へのソーティングを行った。採集物中のカツオ・マグロ類を取り出して80%アルコールに保存した後，ハダカイワシ類，カタクチイワシ類などの魚類，甲殻類，頭足類，その他に分類し10%ホルマリン固定または冷凍保存した。カツオ・マグロ類については全標本を保存して持ち帰ったが，その他の動物群のうち，カタクチイワシ科のタイワンアイノコ，オキアミ目，十脚目などについては，個体数が著しく多く採集された場合（約1kg以上）は，総量を測定した後，1部を無作為抽出して持ち帰った。

カツオについては，実験室においてMatsumoto *et al.* (1984) に従って実体顕微鏡下で外部形態観察により種の査定を行った。マグロ類についても形態観察を行ったが，現在の知見では幼稚魚の外部形態の違いによる種査定ができないため，一部の個体をミトコンドリア DNA の制限酵素切断型によるマグロ属の種判別法 (Chow and Inoue 1993) により査定した。その他の採集標本についても可能な限りの分類を行った。カツオおよびマグロ属の標本については，さらに計測可能なもののみ体長と体重の測定を行った。

結　　果

TANSYU-1, -2型中層トロールの曳網特性

TANSYU-1型を使用した1992年の調査では，調査海域内3－10°N, 137－155°E において合計108回の曳網を実施した。調査船但州丸のワープ長と曳網水深と

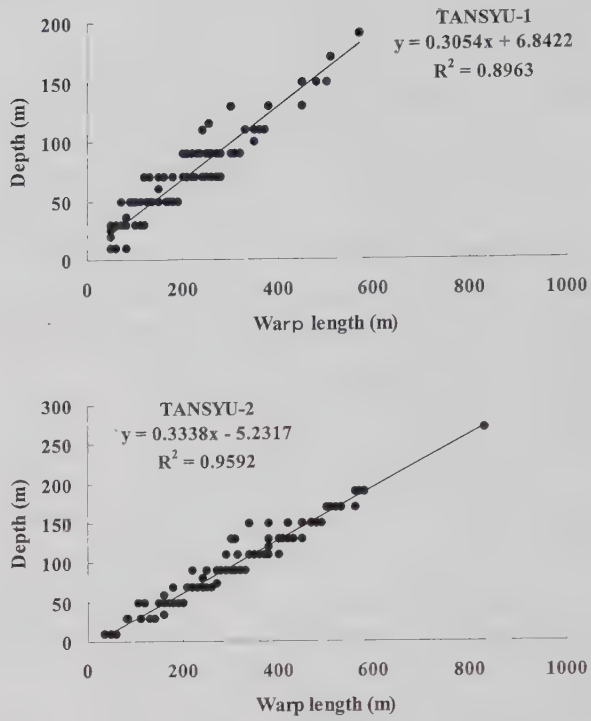


Fig. 2-3. Relationship between the warp length and the towing depth of the midwater trawl net TANSYU -1 (top) and TANSYU-2 (bottom).

の間には，高い正の相関が得られ（図2－3），ワープ長の調節によって TANSYU-1型を目的とした水深で曳網することができた。曳網開始後における水深の微調整は，漁網監視装置からの信号によりヘッドロープ水深を確認しながら，調査船の可変ピッチプロペラによる船速の微調節により所定の水深層を維持した。各曳網水深層における TANSYU-1型の平均曳網速度および平均網口高は，それぞれ4.3－4.9ノットおよび20.2－21.2mであり，設計時に期待した数値が得られた（表2－1）。袖網間隔については，ワープの船尾ギヤロースおよびその2m後方における両舷間隔から計算により推定したところ，表層0－20mでの平均値10.7m（範囲9－15m）から最深部120－200mでの平均値23.9m（範囲14－36m）まで，水深とともに網口が水平方向に広くなる傾向が認められた。これはワープの伸長によって，開口板が海水抵抗を受けて水平方向に拡がる力を増大させることに起因する。したがって，TANSYU-1型の網口形状は，表層近くでは鉛直方向に楕円形となり，60－120mではほぼ円形，これより深い水深では水平方向に楕円形を呈するものと推定された。

TANSYU-1型による漁獲物湿重量を曳網速度別にみると，3.5－4.5ノットでの1時間曳網あたり漁獲量(kg) が多く，それ以下及び以上では明らかに少ない傾向が認められた（図2－4）。これらの結果を見る限り，TANSYU-1型の漁獲効率を最大にするための

Table 2-1. Comparison of characteristics of the towing performances between the midwater trawl nets TANSYU-1 and TANSYU-2

TANSYU-1

Depth (m)	No. of tow	Opening (m)	Warp length (m)	Speed (knot)	Sample (g/1 hr tow)
0－20	9	20.2	58.9	4.9	745.4
20－40	18	21.2	85.0	4.4	1014.5
40－60	22	20.5	140.7	4.3	1466.7
60－80	23	20.6	205.9	4.4	4223.4
80－120	24	20.2	276.0	4.4	10566.6
120－200	10	20.3	442.0	4.8	4978.3

TANSYU-2

Depth (m)	No. of tow	Opening (m)	Warp length (m)	Speed (knot)	Sample (g 1 hr tow)
0－20	5	20.0	49.0	4.8	2662.0
20－40	13	19.5	114.2	4.9	2390.8
40－60	18	19.4	169.2	4.7	4229.4
60－80	15	18.6	228.7	4.5	19486.0
80－120	40	18.1	317.4	4.6	8951.5
120－200	28	18.1	459.3	4.6	3103.2

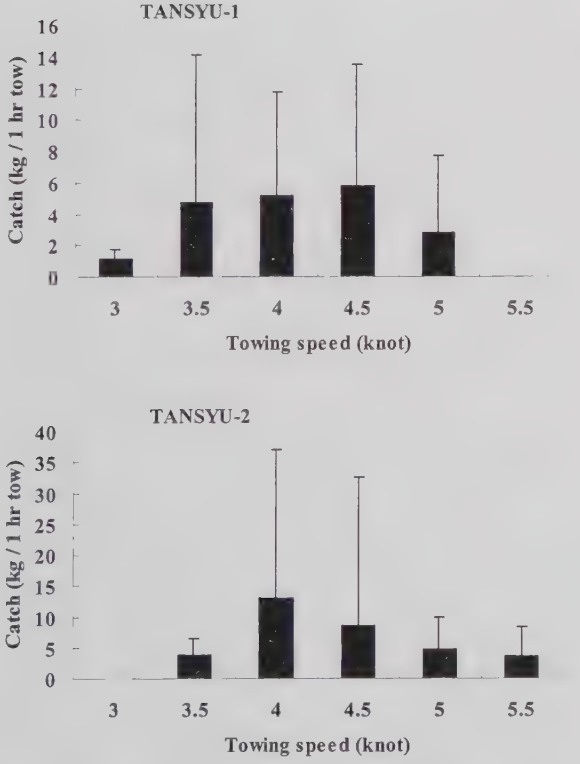


Fig. 2-4. Average wet weight of the total samples collected at various towing speeds of the midwater trawl net. Thick bars indicate average wet weight of total samples; thin bars indicate the standard deviations.

曳網速度が4.5ノット前後にある。曳網水深別の1時間曳網あたり漁獲量では,80－120mで最大を示し，これに次いで120－200mで多く,0－20mで最も少なかった（表2－1)。中層トロールの網口形状は漁獲効率に影響を及ぼすと考えられ，真円に近いほど漁獲効率が高いとされる（西牟田ら　1990)。TANSYU-1型における各曳網水深での網口形状と平均漁獲量を比較すると，漁獲量が最大となった80－120mでは網口形状もほぼ円形に近かったと考えられる。しかしながら，漁獲量は漁獲効率よりもむしろ各曳網水深における生物の現存量を反映すると考えられるため，各水深層に均一に分布する生物種を対象とした漁獲試験を行わない限り,水深別に漁獲効率を求めることは困難である。

1993年の調査では，後述するTANSYU-1型によるカツオ幼稚魚の採集結果を受けて，より効果的な採集漁具とするための改良を加え，TANSYU-2型とした(図2－1b)。TANSYU-1型からの改良点は，袖網及び身網1段目の網目を2000㎜から1000㎜に交換したこと，コッド部を5m延長したこと，コッドエンド内張りの網目を15㎜から8㎜に交換したことである。これらの改良は，主として小型のカツオ稚魚の網目からの逸出を減少させることとコッドエンド部における水流をよりスムーズにすることが目的であった。TANSYU-2

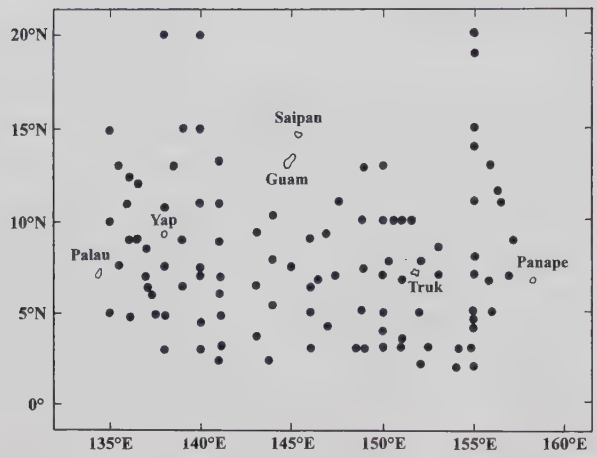


Fig. 2-5. The sampling locations (●) for the midwater trawl net TANSYU in October to December 1992－1996.

型の漁具抵抗は，この改良に伴い1型に比べて約20%増加したが，各曳網水深における平均曳網速度にはほとんど影響が認められなかった（表2－1）。これに対して，平均網口高は1型に比べて2型の方が小さく，その差は曳網水深が深くなるほど大きくなる傾向が認められた。曳網速度別の1時間曳網あたり漁獲量は，1型よりも遅い4ノットで最大となる明瞭なピークが認められた。曳網水深別の平均漁獲量では，80m以深では1615－1875g の減少が見られたもののそれ以浅の4層では大きく増加しており，1型よりも網目を小さくした網口部とコッドエンド部内張りの網目を細くして延長した効果により小型の漁獲物の逸出量が減少したためと推測された。

1993年の調査結果により，TANSYU-2型のカツオ幼稚魚採集用漁具としての有効性を確認できたため，1994年以降の調査ではTANSYU-2型を使用することとした。

TANSYU-2型中層トロールによるカツオ幼稚魚の採集結果

1992年から1996年までの5年間の調査を通じて497回の中層トロール曳網を行い（図2－5），合計6724個体のカツオ幼稚魚とともに1373個体のマグロ属幼稚魚を採集した（表2－2）。カツオ幼稚魚の水平および鉛直分布については第3章で詳しく述べるため，本章では調査海域内での出現状況と体長組成を中心に記述する。カツオ幼稚魚が採集された海域は，調査海域内の1－20°N, 135－157°E と広範囲にわたり，曳網を行った海域のほぼ全体に及んでいた。カツオ幼稚魚の出現した水深範囲も0－240mと広く，彼らが本研究対象海域内において水平・鉛直的に広大な範囲に生息していることが解った（表2－3）。曳網水深層別にカツオ幼稚魚の採集結果を比較すると，40－80m層

Table 2-2. Sampling results of skipjack (SKJ) and other tunas (THS) by years using the midwater trawl net TANSYU in the tropical western Pacific (0－20°N, 130－160°E) during October to December 1992－1996.

Years	Periods	No. of tow	Occurrence (%)		Total specimens		No.inds 1 hr tow	
			SKJ	THS	SKJ	THS	SKJ	THS
1992	10.21－11.23	108	40.7	14.8	324	356	3.0	3.3
1993	10.28－12.05	121	51.2	30.6	1232	255	10.2	2.1
1994	11.01－12.07	98	58.2	37.8	1662	463	17.0	4.7
1995	10.29－12.07	75	46.7	26.7	2928	135	39.0	1.8
1996	10.29－12.09	95	42.1	21.1	578	164	6.1	1.7
Total		497	47.9	26.2	6724	1373	13.5	2.8

Table 2-3. Results of the sampling skipjack tuna by depth stratum using the midwater trawl net TANSYU based on the 1992－1996 cruises.

Depth (m)	No. of tow	Occurrence (%)	No. Inds 1 hor tow (%)	Mean SL±<SD (mm) (range)
0－40	76	30.3	5.8 (12.6)	21.3± 8.3 (10.9－ 70.7)
40－80	163	58.3	20.2 (44.1)	20.6±13.0 (7.1－171.6)
80－120	148	51.4	15.6 (34.1)	28.7±13.5 (5.5－152.4)
120－200	93	43.0	3.8 (8.4)	23.6± 9.5 (9.4－124.5)
200－300	16	18.8	0.4 (0.8)	30.3±15.3 (11.7－ 47.6)

では出現率（幼稚魚が採集された曳網回数 総曳網回数×100）が60%近くを示し，80－120m層でも50%を越えていた。これらの水深層では，1時間曳網あたり採集個体数も20.2および15.6個体と他の水深層に比べて顕著に高く，カツオ幼稚魚が主として40－120mに生息しているものと考えられた。

各年別にカツオ幼稚魚の採集状況を比較すると，年によってかなり採集結果が異なっている（表２－２）。総曳網回数は最多の1993年と最少の1995年の間に1.6倍の差があるため，カツオ幼稚魚の総採集個体数を経年的に比較することはできないが，単位努力量あたりの出現率と１時間曳網あたり採集個体数の年変化を比較することは可能と考えられる。カツオ幼稚魚の出現率は，40.7－58.2%の範囲にあってどの年においても高く比較的変動幅が小さいのに対し，1時間曳網あたり採集個体数では年変化が大きく，最小の1992年と最大の1995年では13倍もの差が認められた。マグロ属幼稚魚の出現率は14.8－37.8%の範囲にあり，カツオと比較すると変動幅が大きくどの年においてもカツオより低い値を示した。しかしながら，マグロ属幼稚魚の出現率の経年変化は，カツオのそれと一致し1992年に最小，1995年に最大値を示した。マグロ属幼稚魚の１時間曳網あたり採集個体数は，1.7－4.7個体とカツオに比べて変動幅が小さく低い値で推移した。出現率は幼稚魚が採集される確率，すなわち幼稚魚と中層トロール網の遭遇確率を反映する数値であるため，彼らの分布範囲の広がりを示す指数であるのに対し，1時間曳網あたり採集個体数は幼稚魚の生息域における分布密度を反映する指数であると考えられる。この点から判断する限り，西部太平洋熱帯域におけるカツオ幼稚魚の分布範囲は外洋表層（０－240m，主として０－200m深）全体に及ぶほどの広がりをもち，分布密度は近縁の熱帯性マグロ属よりかなり高いものと見なされた。

５年間に採集したカツオ幼稚魚の体長範囲は5.5－171.6㎜と幅広く，生活史段階では後期仔魚から幼魚に属し，当初の採集目的とした体長範囲10－200㎜に近かった。年ごとにカツオの体長組成を比較すると，各年の体長範囲（平均±標準偏差）は，1992年が15.2－159.1㎜（33.8±20.1㎜），1993年8.1－148.8㎜（23.4±14.5㎜），1994年7.1－171.6㎜（25.7±18.7㎜），1995年5.5－57.4㎜（21.7±4.7㎜），1996年9.1－69.7㎜（24.2±11.0㎜）で，体長モードは1993年，1994年，1996年には10－19㎜クラスにあり，1992年と1995年には20－29㎜クラスにあった（図２－６a）。各年とも体長範囲10－50㎜の小型稚魚が占める割合が89.6－99.2%と高かったのに対し，体長100㎜以上の幼魚の割合は０－2.3%ときわめて低かった。水深別にカツオの体長を比較すると，体長範囲が最も広かったのは40－80m層，次いで80－120m層，120－200m層の順で，いずれも後期仔魚から幼魚に至る標本が得られたのに対し，40m以浅と200m以深では標本の体長範囲が狭く，採集された標本は全て稚魚であった。マグロ属幼稚魚の体長組成も年による若干の違いは見られるものの，基本的にはカツオの体長組成と類似していた（図２－６b）。各年の体長範囲（平均±標準偏差）は，1992年が15.3－103.1㎜（30.1±6.9㎜），1993年8.0－139.8㎜（22.6±17.7㎜），1994年9.9－137.5㎜（28.0±11.3㎜），1995年9.1－57.4㎜（27.1±11.8㎜），1996年13.3－58.4㎜（24.5±8.6㎜）で，体長モードは1993年と1995年が10－19㎜クラス，1992年，1994年，1996年が20－29㎜クラスにあった。マグロ属でもカツオと同様に体長範囲10－50㎜の小型稚魚が占める割合が94.9－99.4%と顕著に高く，これとは対照的に体長100㎜以上の幼魚の割合は０－2.1%と低かった。幼稚魚の平均体長は，カツオ，マグロ属とも TANSYU-1型で採集した1992年には30㎜を越えていたが，改良した２型を使用した1993年以降はすべて20㎜台であった。

カツオ幼稚魚の採集結果を５年分まとめて昼間（６時から18時まで）と夜間（18時から６時まで）で比較した。昼間は合計220回（全体の44.3%）の曳網を行った結果，4258個体（63.3%）が採集され，1時間曳網あたり採集個体数は19.4個体，出現率は50.9%であった。夜間には合計277回（全体の55.7%）の曳網により，2466個体（36.7%）が採集され，1時間曳網あたり採集個体数は8.9個体，出現率は45.5%で，昼間に比べると出現率ではあまり差がなかったものの１時間曳網あたり採集個体数では昼間の約半分（46%）と少なかった。体長組成をみると，体長モードは昼夜とも10－19㎜クラスで一致していたが，体長範囲（平均±標準偏差）は昼間が5.5－81.8㎜（22.7±9.5㎜）に対して夜間が8.1－171.6㎜（26.0±18.5㎜）で，体長100㎜以上の幼魚は夜間においてのみ採集された（図２－７）。カツオ幼稚魚が１回の曳網で採集された個体数を７クラス（0，10個体未満，50個体未満，100個体未満，500個体未満，1000個体未満，1000個体以上）にわけて頻度分布を作成したところ，昼夜とも個体数が多くなるほど頻度が低くなる傾向が認められた（図２－８）。カツオ幼稚魚が全く採集されなかった曳網点は昼が49.1%，夜間が54.5%で，1個体以上の採集があった曳網点の割合はほぼ同じであった。昼間には１曳網で500個体以上の採集が２回あり，その時の採集個体数は760および1163個体であったが，夜間の１曳網での採集個体数は最大でも349個体にとどまった。

時間帯別にカツオ幼稚魚の採集結果を比較してみると，6－10時は曳網回数が最少で採集個体数は最多であったため１時間曳網あたり採集個体数では113.0個体

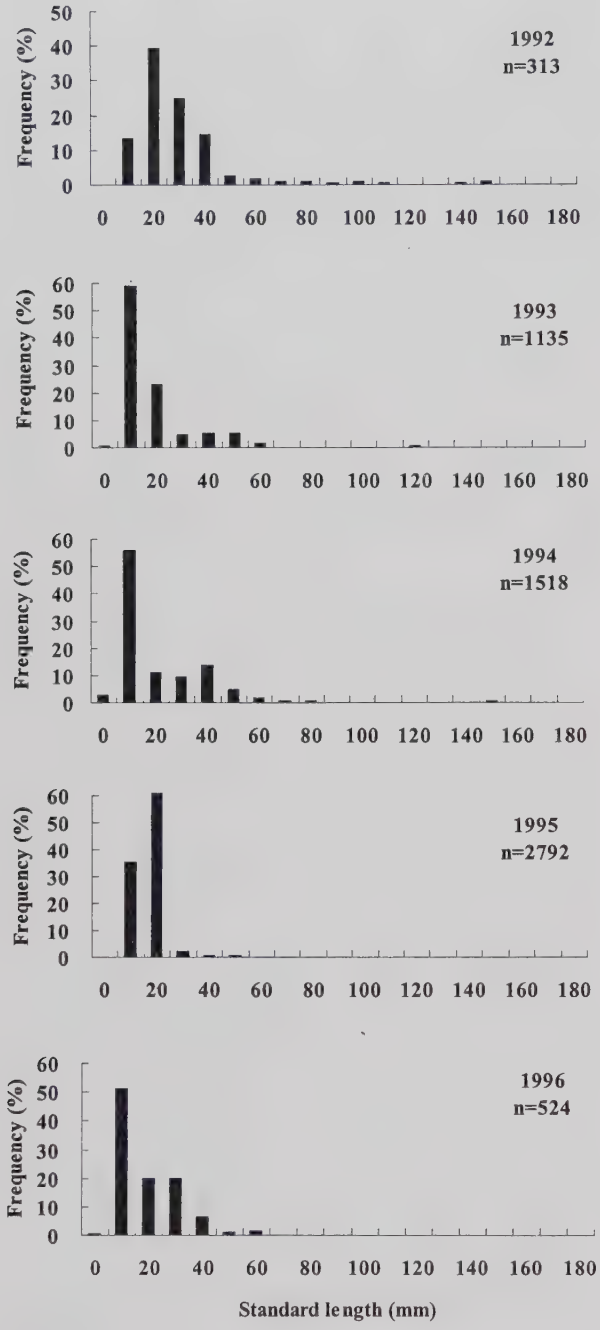


Fig. 2-6a. Length-frequency distribution of *Katsuwonus pelamis* collected by the midwater trawl net in the tropical western Pacific from October to December 1992－1996. TANSYU-1 was used at 1992；TANSYU-2 was used from 1993 to 1996 cruises.

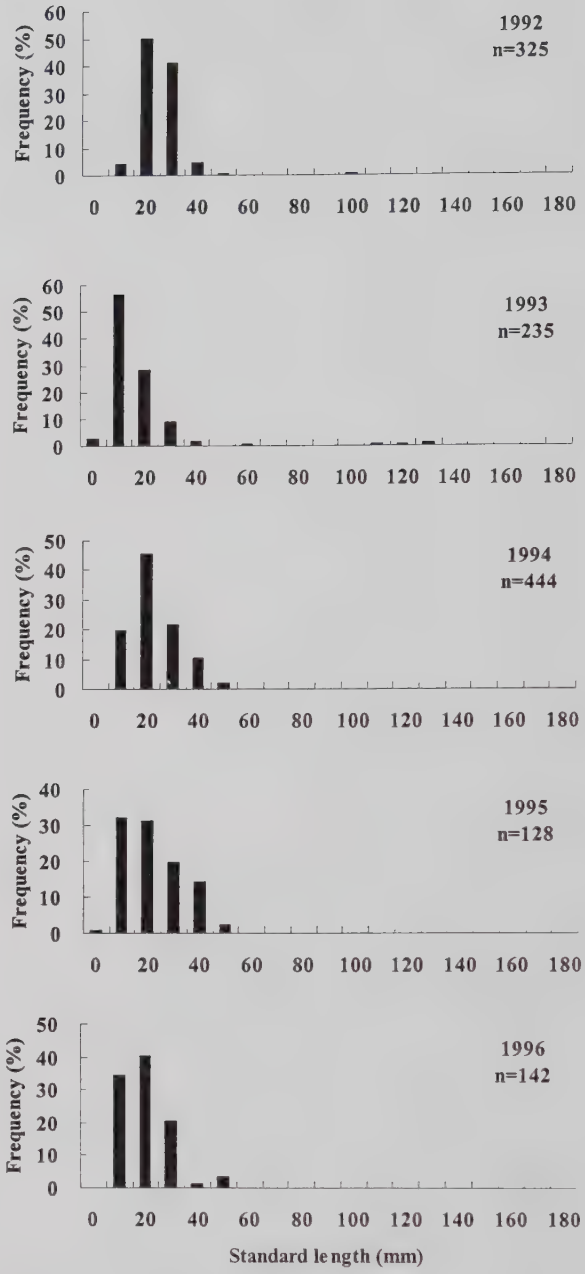


Fig. 2-6b. Length-frequency distribution of *Thunnus* spp. collected by the midwater trawl net in the tropical western Pacific from October to December 1992－1996. TANSYU-1 was used at 1992；TANSYU-2 was used from 1993 to 1996 cruises.

と他の時間帯に比べて著しく多かった（図２－９）。このあとの朝10時から深夜２時の１時間曳網あたり採集個体数は7.6－11.0個体と時間帯による差が小さかったが，深夜から夜明けにあたる２－６時には1.2個体と顕著に低かった。時間帯別の出現率では，2－６時が21.7%と最も低い値を示したが，その他の時間帯では46.5－54.0%であった。

曳網速度別にカツオ幼稚魚の採集結果を比較すると，昼間は曳網速度が最も速い５－5.5ノットで最大の採集結果が得られたが，これとは対照的に夜間は曳網速度が遅いほど採集個体数が多くなる傾向が認められた（図２－10）。しかしながら，出現率と曳網速度との関係では昼夜の違いが不明瞭であり，昼間には5.5ノットと3.5ノットで最大値72.7%を示し，夜間には5.5ノットで最大（66.7%）となった。３ノットでは，昼夜ともに採集することは出来なかった。

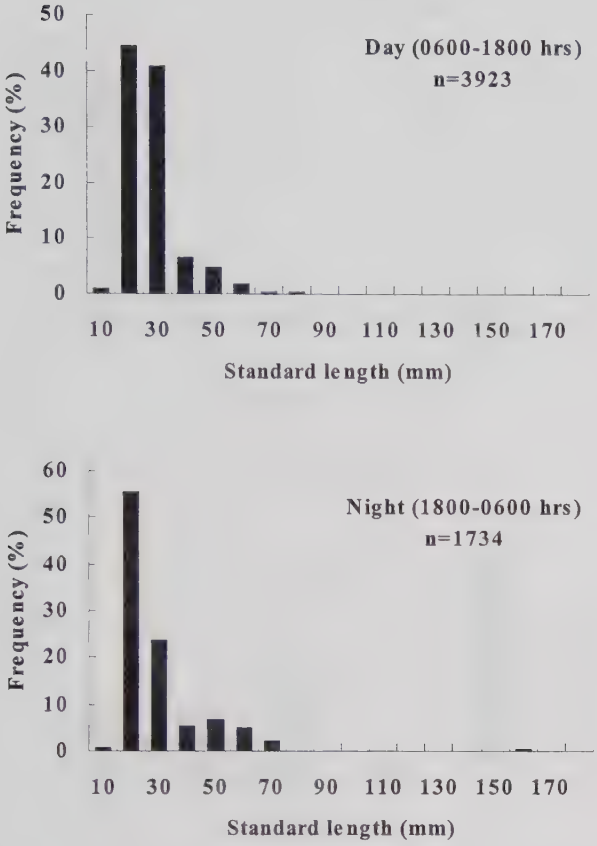


Fig. 2-7. Length-frequency distribution of *Katsuwonus pelamis* for daytime (top) and night (bottom) specimens collected by the TANSYU-2 in the tropical western Pacific from October to December 1993－1996.

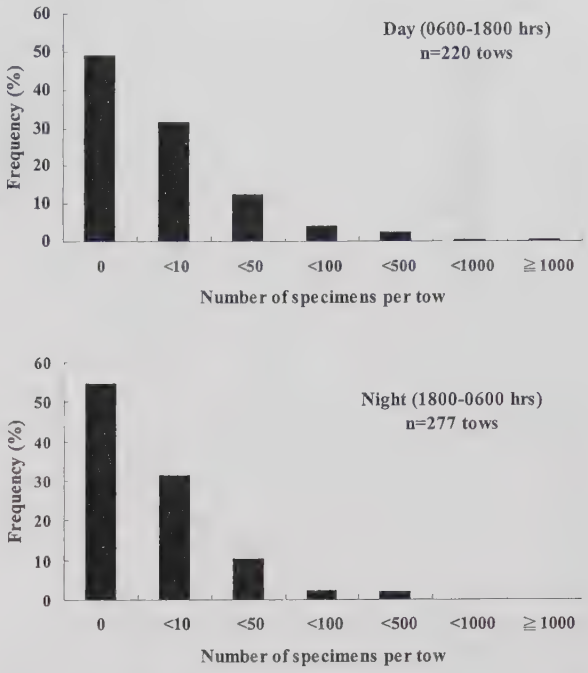


Fig. 2-8. Frequency distributions of number of skipjack tuna for daytime (top) and night (bottom) specimens collected by 1-hour tow of the midwater trawl net in the tropical western Pacific from October to December 1992－1996.

カツオ・マグロ類以外の採集生物

TANSYU-2型を使用して採集したカツオ・マグロ属幼稚魚以外の生物のうち,1993年の標本については無作為抽出により一部を取り出し，可能な限り種査定を試みた。ハダカイワシ類については東京大学海洋研究所,それ以外の魚類については千葉県立中央博物館,頭足類については国立科学博物館において同定がなされた。各年における１時間曳網あたりの平均総漁獲量は，昼間が1.6－6.8kg，夜間が4.8－9.4kgであった。昼間はカタクチイワシ科のタイワンアイノコなどパッチ状の群集を形成する表層性魚類が採集された場合には,100kg以上の漁獲が見られることもあったが，それ以外の漁獲量は１kg以下の場合が多かった。夜間はハダカイワシ科魚類を中心として，オキアミ類，エビ類，頭足類など,日周鉛直移動性の動物群が中心となった。

中層トロール網以外の漁具による採集結果

1992年の航海において，調査開始後の早い段階から中層トロール網により目的としたカツオ幼稚魚が採集可能であると判断されたため，中層トロール網を用いて新たなカツオ幼稚魚採集法の確立を目指すこととし,これ以外の漁具による幼稚魚採集は行わなかった。ただし，曳き縄については午前６時から11時までの航走時に使用し，採集されたカツオ・マグロ類の胃内容物としてのカツオ幼稚魚の出現状況を調べた。５年間の調査を通じて,カツオ90個体(尾叉長32.0－76.0cm)，キハダ120個体（尾叉長25.6－58.6cm)，メバチ15個体(尾叉長39.0－49.6cm）が採集され，このうちカツオ幼稚魚を捕食していたのは，カツオ２個体とキハダ１個体だけであった。

考　　察

パラオ・ミクロネシア周辺の西部太平洋熱帯海域において５年間の採集活動の結果，TANSYU 型中層トロールがカツオ稚魚に対してはこれまでの採集法よりも有効であると判断された。ここでは本研究を通して得られたカツオ幼稚魚の採集法に関する新たな知見の意義について考察するとともに，この分野において解決しなければならない課題が残されている点についても言及する。

TANSYU 型中層トロールによって採集されたカツオの大きさは,5.5－171.6㎜SL であり本種の生活史段階では後期仔魚から幼魚期に相当し，研究史で述べた既存の採集法では得られなかった広い範囲をカバーしている。特に体長10㎜を越えて仔魚期から稚魚期に移行した後のカツオは，これまでに用いられた小口径

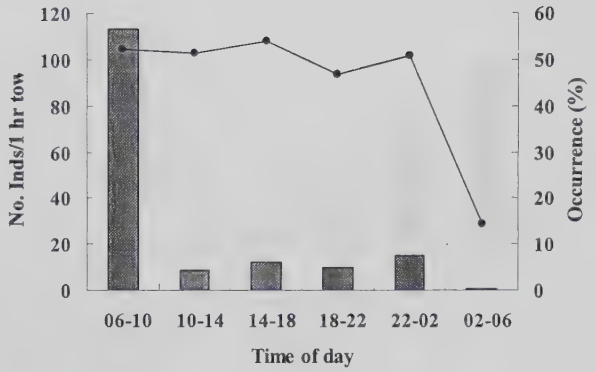


Fig. 2-9. Diel change in frequency of occurrence (●) and number of specimens collected by 1-hour tow of the TANSYU-2 (■) for skipjack tuna in the tropical western Pacific from October to December 1993－1996. Depths of the sampling were conducted in 0－300m.

のネット類ではごくまれに採集される程度であったが，TANSYU 型中層トロールでは5年間で採集されたカツオ6724個体のうち，99%の個体が体長10㎜以上であり，これまでの採集具による採集結果との違いが明確に示された。TANSYU 型中層トロールでの1回の曳網によるカツオの最大採集数は1163個体と多く，カツオの初期生活史における分布や成長を明らかにするために充分な採集量を得ることができた。これまでに用いられたトロールネット類と比較した TANSYU 型中層トロールの特徴は，口径が大きいことと曳網速度が速いことであり，これらが高度な遊泳力を備えたカツオに対して当初の想定通り効果的に作用したものと推定された。

本研究で得られたカツオ幼稚魚の採集データを解析することにより，彼らの生態的な特性を知ることができる目途がつき，第3章以降に述べる幼稚魚の分布，摂餌，成長といった生態学的研究の進展に結びついた。曳網速度別に昼間と夜間の採集結果を解析した結果から，カツオ幼稚魚の効果的な採集を行うためには昼間は曳網速度を5－5.5ノット程度の高速にし，夜間はこれよりも遅い3－3.5ノット程度に調節する必要があることがわかった。これはカツオ幼稚魚における昼夜別の行動の違いにより解釈される。すなわち，昼間は彼らの視覚が作用して活発に遊泳行動あるいは成群行動を行うため，採集するためにはできるだけ曳網速度も速くする必要がある。一方，視覚の働かない夜間には彼らの行動も鈍るため，曳網速度を遅くしても採集することができたと考えられる。曳網時刻別にカツオ幼稚魚の採集結果を解析した結果によると，1曳網で500個体以上の採集があった2点はいずれも7－8時台の早朝であり，これとは対照的に深夜～夜明け前後の2－6時にはもっとも採集量が少なかった。Higgins

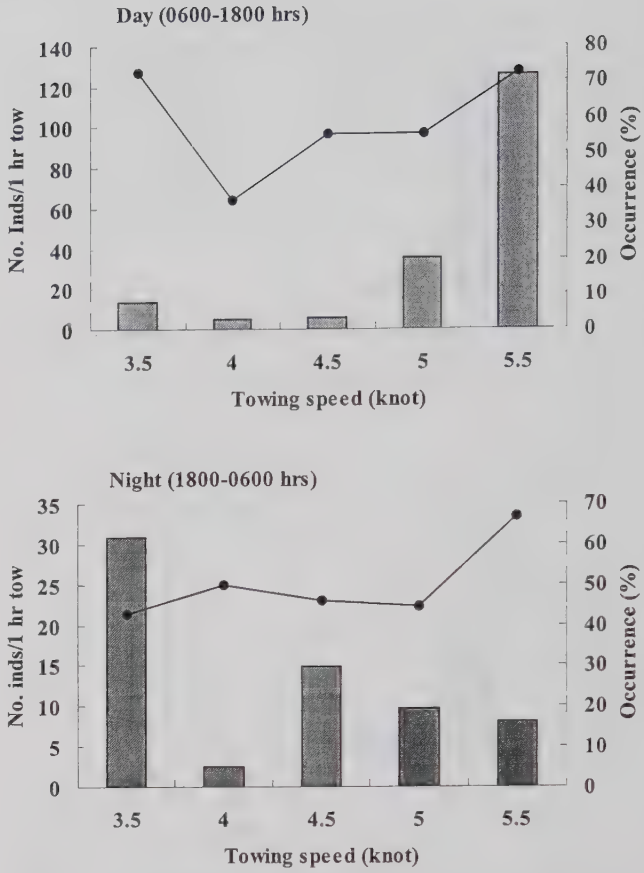


Fig. 2-10. Change in frequency of occurrence (●) and number of specimens of skipjack tuna collected by 1-hour tow (■) at various towing speeds of the TANSYU-2 for daytime (top) and night (bottom) in the tropical western Pacific from October to December 1993－1996.

(1970) は，効率的なカツオ稚魚採集のためには夜明け前から早朝にかけて表層での曳網を行うことを提唱したが，本研究結果では夜明け前と早朝における採集結果は大きく異なっていた。これは Higgins (1970) が用いた中層トロール網は本研究の TANSYU 型トロールに比べて規模が小さく，両者の採集特性の違いに起因すると考えられる。カツオ幼稚魚の分布生態に関してはこのあと第3章で詳しく述べるが，時間帯ごとの採集結果から，カツオ幼稚魚に日周的な行動パターンが存在するものと考えられる。すなわち，視覚の作用する夜明け後にはカツオ幼稚魚は強い成群性を発揮して摂餌など活発に行動するため，TANSYU 型中層トロールが幼稚魚の群に遭遇した場合には数100個体以上の採集結果が得られる。これに対して，日没後の視覚が働かない夜間には成群性が弱くなることにより個体間の距離が大きくなるため，カツオ幼稚魚の採集個体数も少なくなることが考えられる。深夜から夜明け前にあたる2－6時には，カツオ幼稚魚の成群性が最も弱くなり，その結果採集個体数が最低となったと考えられる。カツオ幼稚魚の水深別の採集結果を

みると，最も多くの幼稚魚が出現したのは40－120mであり，彼らの生息水深がこの層を中心としていることをうかがわせた。この層は本研究海域において昼夜鉛直移動を行うハダカイワシ類などの魚類，オキアミ類・十脚目甲殻類，頭足類を中心とした生物量が最も多い水深層と一致しており，熱帯域の外洋表層域における生態系を考える上でも興味深い。

これらカツオの初期生態研究法上の新知見とともに，今後の研究発展を期する上での課題として，定量性に関する知見を中心として今回の採集結果を検討してみたい。定量採集を行う上で最も問題となるのが，対象生物の漁具からの逃避と逸出であり，遊泳能力の高い生物ほどこの問題は深刻である。しかしながら，逃避率や逸出率を正確に算定することは困難であるため，昼夜における採集結果の比較などから推察するしかないのが現状である。１時間曳網あたりのカツオ幼稚魚の採集個体数を頻度分布で表してみると，昼夜とも採集個体数の少ないクラスほど頻度は高い（図２－８）。仮にカツオの逃避能力が TANSYU の採集結果に影響を及ぼしていたとすれば，昼間より夜間の採集個体数が多くなり，夜間には採集個体数が多いクラスの頻度が高くなることが予想される。しかしながら，本研究結果から見る限り，TANSYU の採集能力は少なくとも稚魚期のカツオの逃避能力を上回っていたと判断され，この頻度分布はカツオの分布を定性的に反映した結果であると推察される。一方，TANSYU の網目は最前部が1000㎜と大きく，前方の網目では小型魚の逸出が起こっていた可能性があるが，この割合については本研究結果からは推定することができない。網目の荒い部分では，昼間には対象魚に対する視覚的脅し，いわゆる駆集効果により魚を網内に追い込むが，夜間は見えないので網目からの逸出率が高くなることも推察される。このような逸出率は，曳網速度を速めれば高くなることが予想され，これは夜間の採集効率が高速（５ノット以上）になると低くなるという本結果をよく説明する。網目からの逸出率を推定するためには，身網よりも目合いの小さいポケット網を身網の外側に取り付け（手島ら　1993），そこへの入網状況から推定する方法が考えられるが，カツオのように遊泳力の高い魚種では遊泳行動を充分に把握しておく必要があり，今後の幼稚魚の行動学的な研究の進展が望まれる。また，体長組成の昼夜比較によって示されたように，稚魚においては逃避の問題はないと見られるが，体長100㎜を超える幼魚においては，夜間にしか採集されなかったことおよび採集個体数が少なかったことにより，網口からの逃避の問題が残されていると考えられる。この問題の解決策の１つとして，より大型の中層トロール網を用いることも考えられるが，水産庁漁業調査船開洋丸によって1998年春季に行われた開口部直径約60ｍの中層トロール網を用いた採集試験では，体長100－300㎜のカツオ幼魚は採集できなかった（田邉ら　未発表）。幼魚期の採集法が確立されれば，本研究で確立された稚魚期，既存の小型ネット類が使用できる仔魚期，漁業による採集結果が利用できる未成魚・成魚期，と生活史の全段階にわたって有効な採集法が確立されることになる。

採集法の確立とは，単に捕獲対象とする海洋生物に対してどの漁具を用いるかという点だけでなく，その漁具を調査海域においてどのようなサンプリング計画のもとで運用するか，という点もあわせて検討されなければならない。前者は漁具の種類と仕様の選定を意味し，後者としては調査海域と時期，調査点の配置，曳網時刻，曳網水深と速度をそれぞれどのように設計するかが重要である。本研究で得られた結果から，西部太平洋熱帯海域はカツオの産卵から幼魚期にわたる初期生態研究の場として適切と考えられるが，調査時期については今後10－12月とは異なった時期にも採集を行い，カツオ幼稚魚の季節別出現状況を明らかにする必要がある。TANSYU を使用した場合の曳網時刻については，稚魚に対しては昼夜での逃避率の差を考慮する必要はないが，幼魚では大きく影響を受けるため夜間に曳網を行う必要がある。また，曳網速度と水深については，昼間は対水速度５ノット，夜間は４ノットを基本とし，水深40－120ｍを中心とした多層曳きが有効であると考えられる。

第３章　稚魚期から幼魚期にかけての分布生態

カツオは熱帯の外洋域を産卵場として生活史初期をこの海域で過ごす。太平洋では東部よりも西部において分布密度が高いことから（上柳　1969），太平洋でのカツオ資源の主要な再生産場は西部熱帯外洋域と考えられている（田邉ら　1998）。熱帯域では周年にわたり北東および南東貿易風が卓越し，これらをエネルギー源とする北赤道海流および南赤道海流が高温の表層水を西側に集積するため，通常年では東部よりも西部の広範な海域での水温が高い。そのため，西部太平洋ではカツオ仔魚の出現する表面水温25℃以上の海域が35°N まで広がり，仔魚の水平分布も東部太平洋から西部太平洋にかけて南北方向に広くなっている。西部太平洋熱帯海域では，カツオ仔稚魚が周年にわたって出現することから（西川ら　1985），いくつかの親魚群が広大な海域を移動しながら連続的に産卵活動を行っていると推定される（Hunter *et al*. 1986，永沼　1979）。熱帯外洋域では，水温・塩分，海流などの物理環境と餌生物プランクトンを初めとした生物環境

の季節変動が比較的少なく，このことがカツオの周年にわたる再生産活動にとって有利な条件となっている。本種は周年高水温が維持されるこの海域の環境特性に適応することにより，外洋生態系の中で高次捕食者としての地位を確立し，低緯度から中緯度までの広大な海域に生活圏を拡大することができたと考えられる。

カツオの成長段階ごとの水平・鉛直分布特性を調べることは，本種がいつ，どこで，どのような生活をしているのか，という最も基本的な生態を明らかにすることにつながる知見である。高度回遊性のカツオの稚魚期から幼魚期は，仔魚期を終えて鰭や骨格の発達とともに遊泳能力を急速に増大させることにより，行動範囲を拡大していく段階にあると考えられる。カツオにとって生活史の中で稚魚期から幼魚期が生態学的にどのように位置づけられるかという点を明らかにするために，この時期の分布生態を詳しく調べる必要がある。第1章の研究史で詳しく述べたように，稚魚期への移行期前後から幼魚期にかけての分布生態については，断片的な知見しか明らかにされておらず，彼らがどこでどのような生活をしているのかはほとんど不明である。その原因として，カツオ幼稚魚のもつ卓越した遊泳能力により採集が困難であったことが挙げられる。

本研究では，新たに確立された中層トロール網によるカツオ幼稚魚採集法を利用することにより，1992年から主要な生息海域とみられる西部太平洋熱帯外洋域において大規模なカツオ幼稚魚分布調査を実施し，本種の稚魚期から幼魚期における水平的，鉛直的な分布特性を調べた。西部太平洋熱帯海域は，研究史で述べたようにカツオ仔魚の分布密度（上柳　1969，西川ら1985）やマグロ・カジキ類の胃内容物としてのカツオ幼稚魚の出現量（森　1972）が東部太平洋に比べていずれも大きいことが知られており，年間を通じて絶えず再生産が行われ幼稚魚が成育しているものとみられることから，本種の稚魚期から幼魚期にかけての分布生態に関する研究海域として最も適した海域であると判断した。

材料および方法

調査時期，調査海域および調査船

1992年から1996年までの5年間にわたり，毎年10月下旬から12月中旬にかけて52－53日間の調査航海を，パラオ諸島の東沖からポナペ島西沖までのミクロネシア周辺海域（0－20°N，130－160°E，第2章図2－2参照）内のパラオ共和国およびミクロネシア連邦共和国200海里経済水域と公海域において実施した。

調査船として1992－1993年には兵庫県立香住高等学校の漁業実習船但州丸（444トン）を，1994－1996年には山口県立水産高等学校の漁業実習船青海丸（403トン）を使用した。両調査船とも2層甲板式の船尾トロール船であり，大規模な中層トロール網を曳網することが可能であった。

採集方法

本研究の調査航海では，TANSYU 型中層トロール網を使用してカツオ幼稚魚の採集を行い，稚魚期から幼魚期にかけての分布生態に関する情報を収集した。TANSYU 型中層トロール網は，第2章で記載したように遊泳能力の優れたカツオ幼稚魚の大量採集を目的として開発された高速曳網型の大規模中層トロール網であり，その開口部直径は高さ，幅ともに約20m，全長71.6mで，最大曳網速度は5ノットである（Tanabe and Niu 1998）。コッドエンドの内側には，小型稚魚の網目からの脱落を防ぐ目的で目合い8㎜，長さ8.6mの内張り網を取り付けた。

TANSYU 型中層トロールの曳網は，各年グアム島の西側で1次航海，東側で2次航海を行い，それぞれに7－14の調査定点を設けた（第2章図2－5参照）。採集を昼夜別に行うことにより，カツオ幼稚魚の日周的な鉛直移動を調べた。曳網水深は0－300mの範囲内で，原則として20mごとに各層1時間の水平曳きを実施し，幼稚魚の水平分布と鉛直分布に関する知見を収集した。中層トロールには開口部の開閉装置はないが，投網時および揚網時にはオッターボードの展開力が作用しないため網口は閉じた状態になり，サンプリング時における浅層での入網によるコンタミネーションはほとんど問題にならないと考えられる（Watanabe *et al*. 1999）。曳網中における開口部の水深と高さは，身網1段目に取り付けた漁網監視装置（Furuno FNR－200）により常時観察しながら目的の網深度を維持するよう操船した。

揚網後，コッドエンド内張り網後端より全採集生物を計量用容器中に取り出し，全体の湿重量を計測した。その後直ちにソーティングを行い，カツオとマグロ属幼稚魚を取り出して80%アルコール中に保存するとともに，その他の採集生物についてもハダカイワシ類，カタクチイワシ類などの魚類，甲殻類，頭足類，その他の大まかな動物群に選別し，10%ホルマリン固定または冷凍保存した。

海洋物理環境要因

本研究海域内では，北側に北赤道海流，南側に北赤道反流という2つの海流系が東西方向に発達し，年間を通じて高水温が維持される海洋物理環境を特徴付け

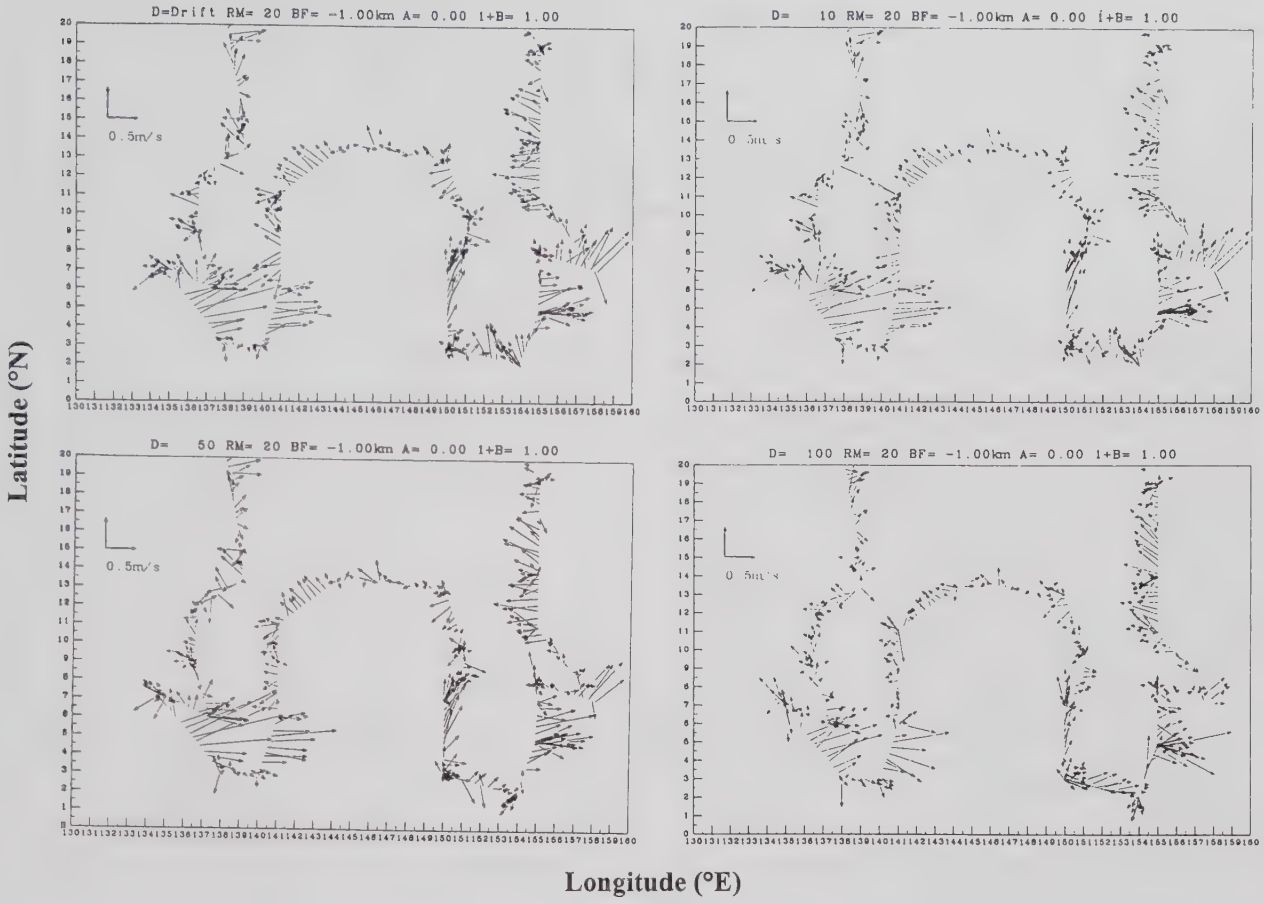


Fig. 3-1a. Distribution of the current direction and speed in the depths of 0m (top left), 10m (top right), 50m (bottom left), and 100m (bottom right) observed by an ADCP at the R/V *Omi Maru* 1995 cruise.

ている。カツオ幼稚魚がこのような海洋環境とどのように関わりながら生活しているのかを調べるために，水温，塩分および流向・流速の観測を実施した。水温と塩分の観測にはメモリー式 CTD（Seabird electronics SBE-19）を使用し，中層トロール網の投網開始位置で原則として1日1測点において海面付近から水深1000mまでの観測を行った。流向と流速の観測には潮流計（Furuno CI-30）を使用し，水深10m，50m，100mの3層について各観測定線上において航走中2分ごとに観測した。また，気象庁気候・海洋気象部発行の海洋月報を資料として用いることにより，同一時期における本研究海域での海洋観測データを補足した（気象庁気候・海洋気象部　1995，1996）。

実験室での標本処理とデータ解析

調査航海終了後，実験室において Matsumoto *et al*. (1984) に従って実体顕微鏡下で外部形態の観察によりカツオ幼稚魚の種査定を行い，デジタルノギスを使って体長を0.1㎜単位で，電子天秤を使って体重を0.01 g 単位で測定した。マグロ属の幼稚魚については外部形態では属レベルまでしか査定できないため，一部の個体についてミトコンドリア DNA による種判別を行い（Chow and Inoue 1993），カツオと同様に体長・体重測定を行った。

稚魚期と幼魚期の発育段階区分

カツオの初期生活史における発育段階区分については，第1章で詳しく述べたように稚魚を鰭条数が定数に達し体の各部の特徴が発現初期にある段階，幼魚を鰓耙数が定数に達して体の各部の特徴が発現・完成し，種の形態的特徴が現れる段階と定義した。

結　　果

物理環境要因による海域区分

ADCPにより観測された表面，水深10m，50m，100mでの流向・流速は，観測点を起点とするベクトルの向きと長さによってそれぞれ示した（図3－1a，b）。各点における水深別のデータを比較してみると，流速は表面から50mまでほぼ一定で100mではこれらよりも遅くなる傾向が認められたものの，流向には水深による違いはなかった。本研究海域に存在する主要な海

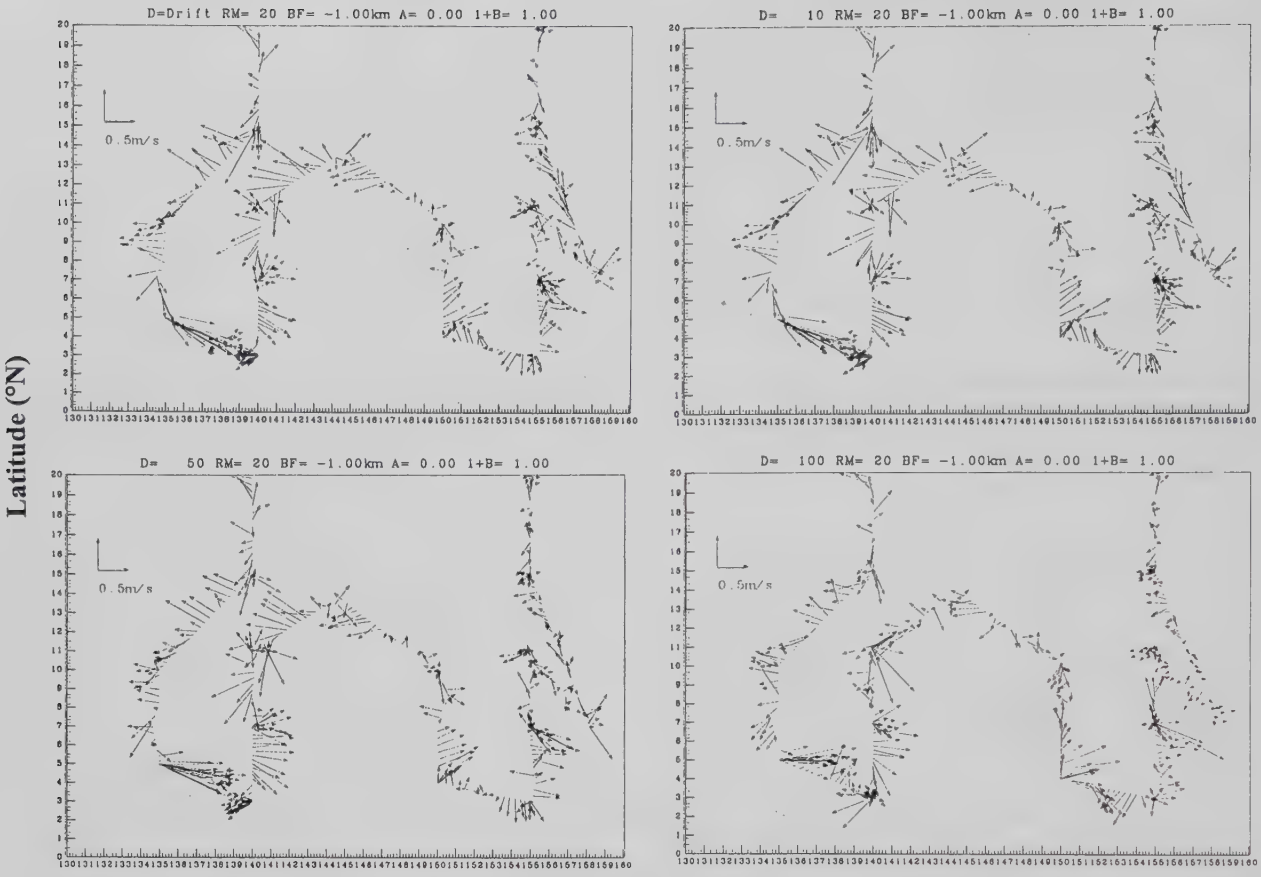


Fig. 3-1b. Distribution of the current direction and speed in the depths of 0m (top left), 10m (top right), 50m (bottom left), and 100m (bottom right) observed by an ADCP at the R V *Omi Maru* 1996 cruise.

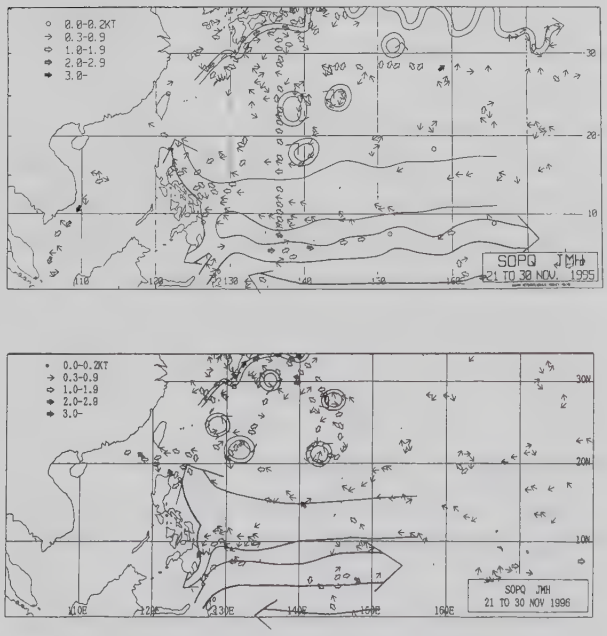


Fig. 3-2. Distribution of surface currents during late November 1995 (top) and 1996 (bottom) in the tropical-subtropical western Pacific. (Referred from Japan Meteorological Agency 1995, 1996)

流は，北側の北赤道海流（西向き）と南側の北赤道反流（東向き）であった。北赤道海流は1995年には155－150°E にかけて11－16°N を西進，143－140°E で北西と西に向かう流れが見られ，137°E 付近では西向きの流れとともに一部南西に向かう流れが観測された。1996年には157－155°E 付近で10－13°N を北西に向かい，152°E 付近で14－15°N を西進，150－142°E 付近にかけて西南西に向かって12°N まで南下した後，141°E 以西では北西に向かう流れの他，一部は南西に向かう流れに分岐していたものと推定された。これに対し，北赤道反流は1995年には136－141°E にかけて3－6°N を東進，150°E 付近で4－7°N を北東に向かった後155°E 付近で東向き，157°E 付近で再び北東に向かって流れていた。1996年には135－140°E にかけて4－7°N を一部は北東方向に蛇行しながら東進，150°E 付近で再び北東向きの流れが見られ，155°E－158°E では4－7°N を東向きに流れていた。これらの結果をまとめると，北赤道海流，北赤道反流ともに南北方向に蛇行する海域が見られるものの，基本的には北赤道海流は10－16°N を西向きに

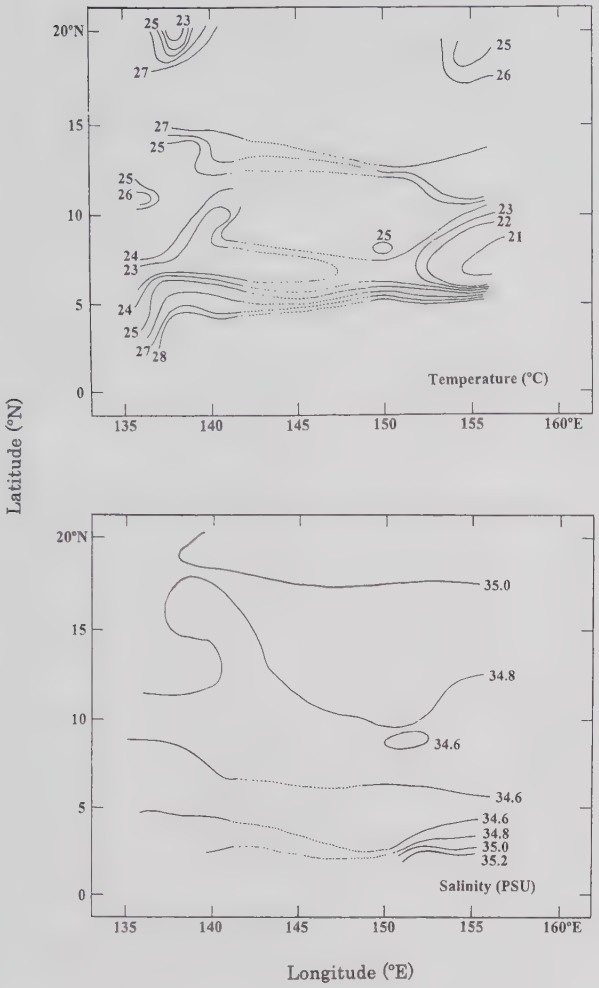


Fig. 3-3. Horizontal distribution of temperature (top) and salinity level (bottom) at 100m depth in the nursery ground of skipjack tuna. Data was based on CTD casts in October to December 1995.

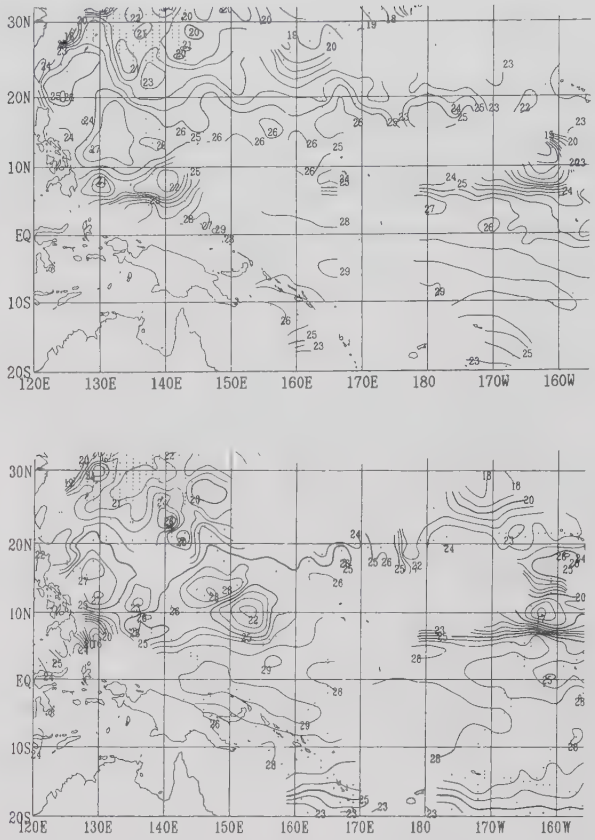


Fig. 3-4. Horizontal distribution of temperature at 100m depth in November 1995 (top) and 1996 (bottom) in the tropical-subtropical western Pacific. (Referred from Japan Meteorological Agency 1995, 1996)

流れ，北赤道反流は3－7°Nを東向きに流れていたと考えられる。今回観測された流速の最大値は，北赤道海流が毎秒85cm，北赤道反流が毎秒140cmであった。気象庁海洋月報1995年11月および1996年11月に掲載された北西太平洋海流図でも北赤道海流と北赤道反流のおおよその位置を知ることができ，本研究による観測結果と同様に両海流とも小規模な蛇行をともないながら北赤道海流は西向き，北赤道反流は東向きに流れていた（図3－2）。

1995年の緯度・経度1度ごとのCTD観測による水温・塩分データをもとに，100m深での等温線・等塩分線図を作成した（図3－3）。5－10°Nでは，水温21－23℃の低水温域が存在し，その北側および南側に向かうほど高水温域になっていた。塩分でも5－10°Nでは34.6PSUと最も低い濃度を示し，その北側および南側の海域に向かって高塩分になっていた。気象庁海洋月報の1995年11月および1996年11月の100m深水温分布によれば（図3－4），1995年には6－10°N，130－140°Eを中心として21－23℃の低水温域が存在し，その北側と南側は25－27℃の高水温域であった。1996年には7°N，130°Eおよび10°N，153°E付近にそれぞれ20℃と22℃の低水温域が見られ，それらの周辺海域は25－29℃の高水温域であった。

1995年の137°Eおよび155°Eの観測定線での水温と塩分の鉛直断面を作成すると，海洋物理的特徴が南北方向で海域ごとに異なることが明らかになった（図3－5a，b）。水温鉛直断面では，17－18°Nおよび3－4°Nを中心にその南北の海域は高水温帯が100－120m深まで入り込んでいたが，これとは対照的に6－9°Nを中心に低水温帯が表層に向かって100m深付近まで張り出していた。北赤道海流と北赤道反流の流路となっている海域では，表面から水深100mにかけて28℃以上と高温の表層混合層が形成され，その下側に水温躍層が発達していた。7－8°Nを中心とした海域は北赤道海流と北赤道反流の境界に位置し，下層からの湧昇によってもたらされた低水温域が100－200m層に存在するため，水温躍層が顕著に現れていた。塩分鉛直断面では，どの海域も下層に向かって高塩分になる傾向が認められたが，7－10°Nを中心に最も塩分濃度

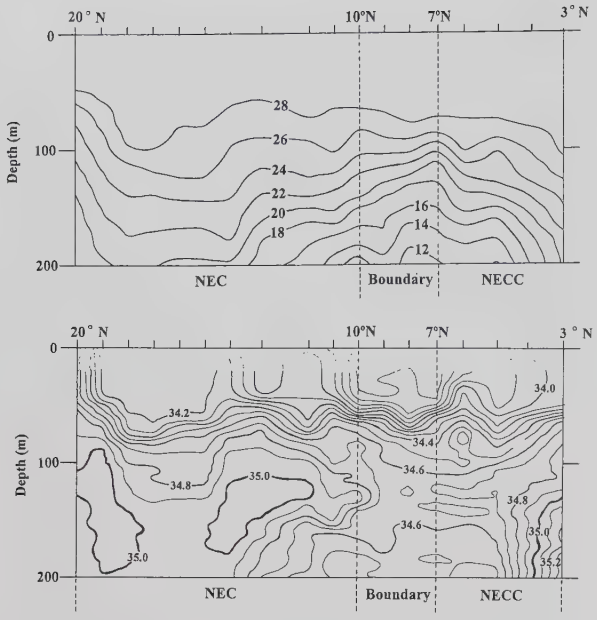


Fig. 3-5a. Vertical distribution of temperature (top) and salinity level (bottom) along 137°E cruise track based on CTD casts in October to December 1995.

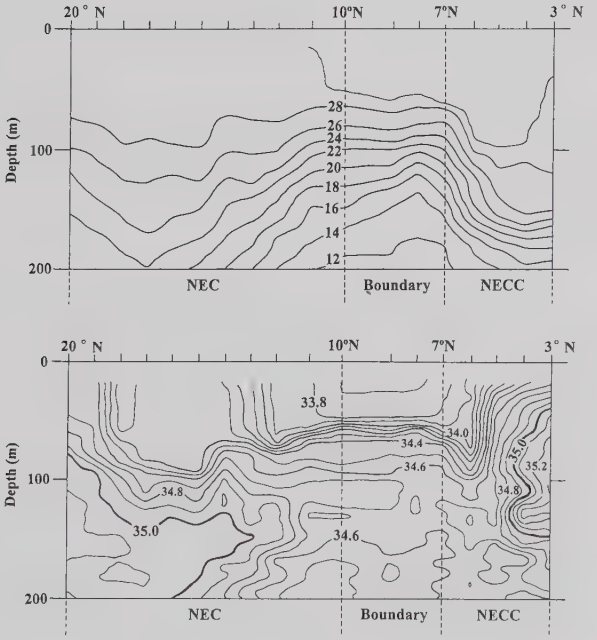


Fig. 3-5b. Vertical distribution of temperature (top) and salinity level (bottom) along 155°E cruise track based on CTD casts in October to December 1995.

の低い海域が存在した。塩分濃度35.0を超える高塩分層は，12－20°N では水深100－200mに，3－4°N では水深130－200m（137°E）または50－140m（155°E）にそれぞれが観測され，155°E ラインでは5－6°N に顕著な塩分フロントが見られた。

本研究海域の栄養塩類の分布については，平成3年度開洋丸第1次調査航海による海洋大循環並びにアカ

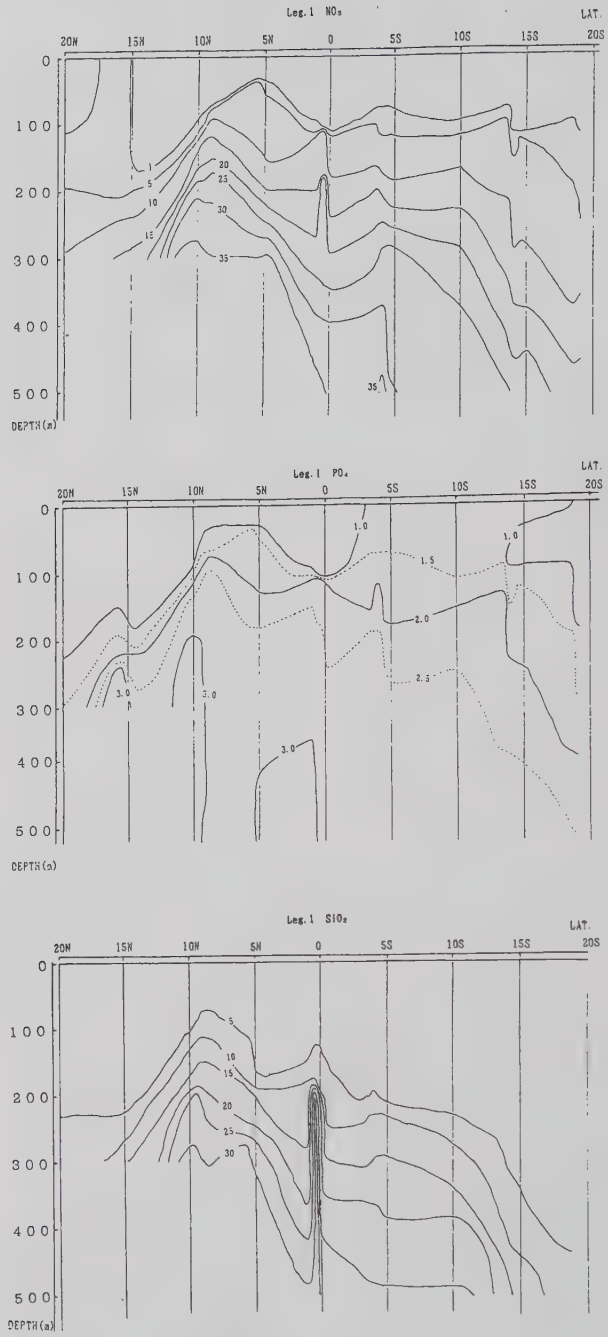


Fig. 3-6. Vertical distribution of NO_3-N, PO_4-P, and SiO_2-Si levels along 160°E cruise track based on the research cruise of R V *Kaiyo Maru* in November 1991. (Referred from *Kaiyo Maru* 1992)

イカ調査速報の資料を参照した（図3－6）。硝酸態窒素，リン酸塩リン，珪酸態珪素の南北方向での鉛直分布は，水深50m以浅の表層高水温域での活発な生物活動を通じての栄養塩類の消費による栄養塩枯渇を示しているが，6－9°N では湧昇によって栄養塩類を多く含む下層水が上層に向かって張り出している。この海域では南北の海域よりも栄養が豊富なため，クロロフィル a 値も相対的に高くなっていた。

調査海域は，以上のような物理化学的環境要因の分

Table 3-1. Occurrences and densities of skipjack tuna at daytime and night by sampling areas during October to December 1992－1996.

Daytime (0600－1800)

Areas*1	No. of tow*2	Occurrence		No. inds/1 hr tow (mean±SD)	
		Juvenile	Young	Juvenile	Young
NEC	69	37.7	0.0	21.3±103.8	0.0
Boundary	50	40.0	0.0	6.7± 21.2	0.0
NECC	101	65.4	0.0	24.3± 86.2	0.0

*1NEC：north equatorial current area；NECC：north equatorial counter current area；Boundary；the area between the NEC and NECC.
*2Sampling depths were 0－300m, horizontally towed by 20m depth strata.

Night (1800－0600)

Areas*1	No. of tow*2	Occurrence		No. inds/1 hr tow (mean±SD)	
		Juvenile	Young	Juvenile	Young
NEC	68	26.5	0.0	7.5±42.8	0.0
Boundary	70	31.4	0.0	5.1±24.5	0.0
NECC	139	58.3	8.6	11.3±34.3	0.2±0.8

*1NEC：north equatorial current area；NECC：north equatorial counter current area；Boundary；the area between the NEC and NECC.
*2Sampling depths were 0－300m, horizontally towed by 20m depth strata.

布構造に従って，10－20°N を中心とする北赤道海流域，7－10°N 付近の境界域，0－7°N を中心とする北赤道反流域に区分できる。

カツオ幼稚魚の水平・鉛直分布

1）カツオ稚魚および幼魚の水平分布

物理・化学環境要因により区分した海域別のカツオの分布量を，出現率と1時間曳網あたり採集個体数を用いて稚魚と幼魚それぞれについて昼夜別に比較した（表3－1）。5年間での中層トロールの合計曳網回数497回のうち，北赤道海流域では全体の28%，境界域では24%，北赤道反流域では48%の曳網を行った。採集されたカツオ稚魚は，合計6699個体であった。

ここで，出現率によって分布域の広がりを，1時間曳網あたり採集個体数によって分布密度を海域ごとに比較する。稚魚の出現率は，昼夜ともに北赤道海流域，境界域，北赤道反流域の順，すなわち北から南に向かって高くなった。北赤道反流域での稚魚の出現率は，北赤道海流域の1.7倍（昼間）および2.2倍（夜間），境界域の1.6倍（昼間）および1.9倍（夜間）であった。全ての海域において，稚魚の出現率が夜間よりも昼間の方が高く，昼夜の差は北赤道海流域（11.2%），境界域（8.6%），北赤道反流域（7.1%）の順に大きかった。1時間曳網あたり採集個体数では，昼夜ともに北赤道反流域，北赤道海流域，境界域の順に高い値を示した。昼間は，北赤道反流域では境界域に比べて明らかに高く（$p<0.05$），北赤道海流域に比べても高かった。夜間には，全ての海域での1時間曳網あたり採集個体数が昼間よりも低かった。境界域での昼夜の差はわずかであったが，北赤道海流域と北赤道反流域では夜間の採集個体数が顕著に低下した（$p<0.05$）。北赤道海流域で採集されたカツオ稚魚1986個体のうち，全体の77%にあたる1532個体が1995年に1調査点（11°N，154－155°E）での4曳網で採集された。1回の曳網でのカツオ稚魚採集個体数の変動幅は，昼夜および海域によらず大きかった。一方，幼魚は1992年から1994年に合計25個体が採集されたが，1995年以降は採集されず，全個体が夜間に北赤道反流域から採集された。幼魚の北赤道反流域における出現率は，同海域における稚魚の出現率の7分の1で，1時間曳網あたり採集個体数では57分の1であった。

調査年別のカツオ稚魚および幼魚の水平分布を，緯度・経度1度ごとの1時間曳網あたり採集個体数によって示した（図3－7a，b，c，d，e，f）。中層トロールの曳網位置は，経年的に北側に拡大していったが，これは第1章の研究史で述べたようにこれまでカツオの稚魚期から幼魚期にかけての採集法が確立されていなかったために，この時期の分布に関する知見がほとんどなく，当初10°N 以南を10－12月期のカツオ幼稚魚分布域と想定していたためである。1995年および1996年の調査によって，カツオ稚魚が北赤道海流の北側および亜熱帯収斂線の南側にあたる20°N 付近にも

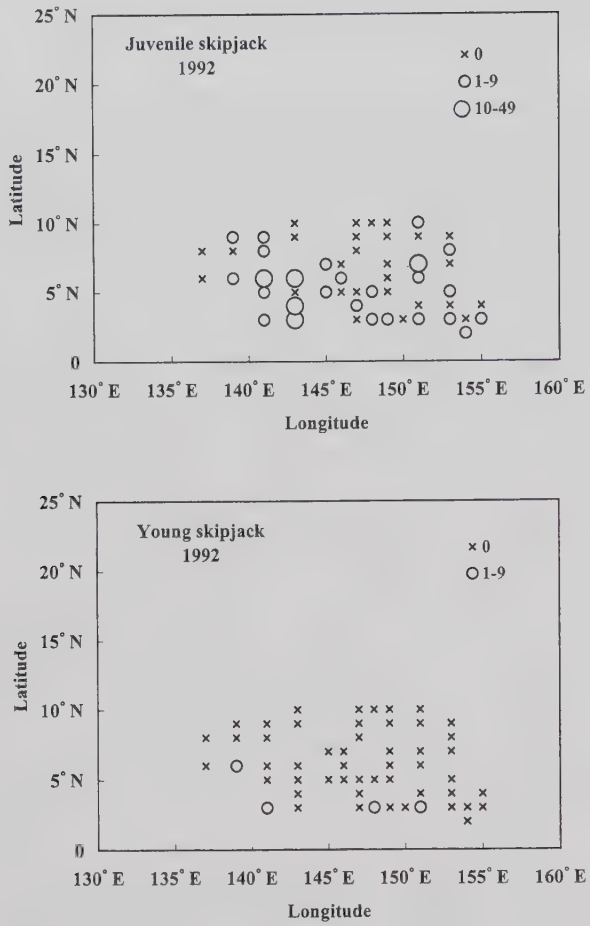


Fig. 3-7a. Horizontal distribution of juvenile (top) and young (bottom) skipjack in the tropical western Pacific from October to December 1992. Abundances of skipjack (○) at each 1×1 degree are calculated by total number of specimens divided by number of tows. Cross (x) marks indicate negative catch.

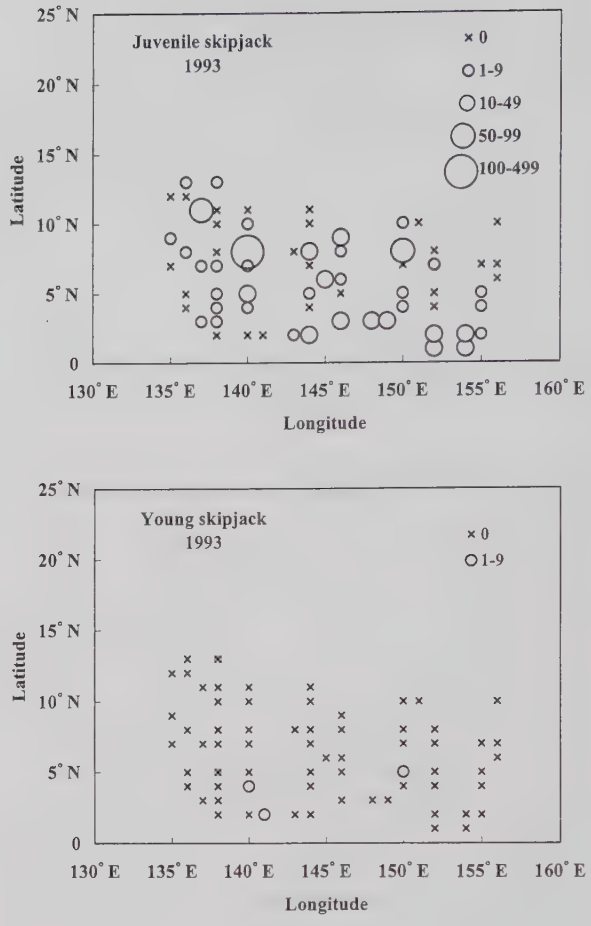


Fig. 3-7b. Horizontal distribution of juvenile (top) and young (bottom) skipjack in the tropical western Pacific from October to December 1993. Abundances of skipjack (○) at each 1×1 degree area are calculated by total number of specimens divided by number of tows. Cross (x) marks indicate negative catch.

分布していることが確認され，稚魚期におけるカツオの分布域の広がりが本研究海域のほぼ全体に及ぶことが明らかになった。稚魚の水平分布の特徴は，年によって異なっていた。1992年の分布図では，南北方向で見るとカツオ稚魚は6°N以南に多く分布し，7°N以北では採集されなかった点が多い。稚魚が10－49個体採集された点は7°N以南に限られ，5点のうちの4点が3－6°N，141－143°Eの海域にあった。東西方向で見ると，稚魚は139－143°Eと151－153°Eに多く，147－149°Eで少なかった。幼魚は，6°Nと3°Nの合計4点で出現した。1993年の稚魚では，南北および東西方向で海域的な偏りが少なく，調査海域内の広範囲に及ぶ分布を示した。8°N150°Eと11°N137°Eの2点で50－99個体，8°N140°Eでは100－499個体と他の点よりも高密度な分布が見られた。幼魚は2－5°Nの合計3点に分布していた。1994年には，稚魚は北から南に向かって分布密度が高くなる傾向が見られた。この傾向は，特に最も東側の調査定線154－157° Eにおいて顕著であった。幼魚の分布は，2°N，4° N，6°Nで1点ずつ見られた。1995年の稚魚の分布では，南北方向よりも東西方向での水平分布の違いが顕著に現れた。150°E以西では50個体以上の分布密度を示す点は出現しなかったが，154－155°Eでは100－499個体が1点，500個体以上が2点と高密度な分布域が見られた。1996年の稚魚の分布では，20°Nでも稚魚が出現し，海域的な分布の偏りは比較的少なかった。これらの結果から，西部太平洋の熱帯外洋域での10－12月期におけるカツオ稚魚の分布は，基本的には分布密度の高い海域が常に同じ場所に存在するわけではなく，年によって変動することが明らかになった。幼魚は，基本的には6°N以南の北赤道反流域を主な分布域とするが，稚魚期の分布から見て成長とともに北赤道海流域や境界域から北赤道反流域に移動してくる可能性も考えられる。

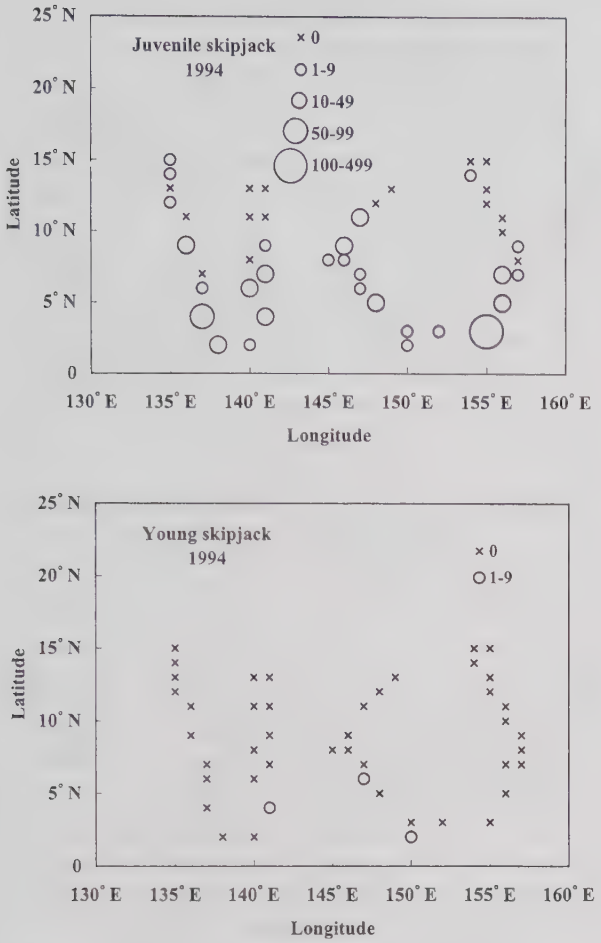


Fig. 3-7c. Horizontal distribution of juvenile (top) and young (bottom) skipjack in the tropical western Pacific from October to December 1994. Abundances of skipjack (○) at each 1×1 degree area are calculated by total number of specimens divided by number of tows. Cross (x) marks indicate negative catch.

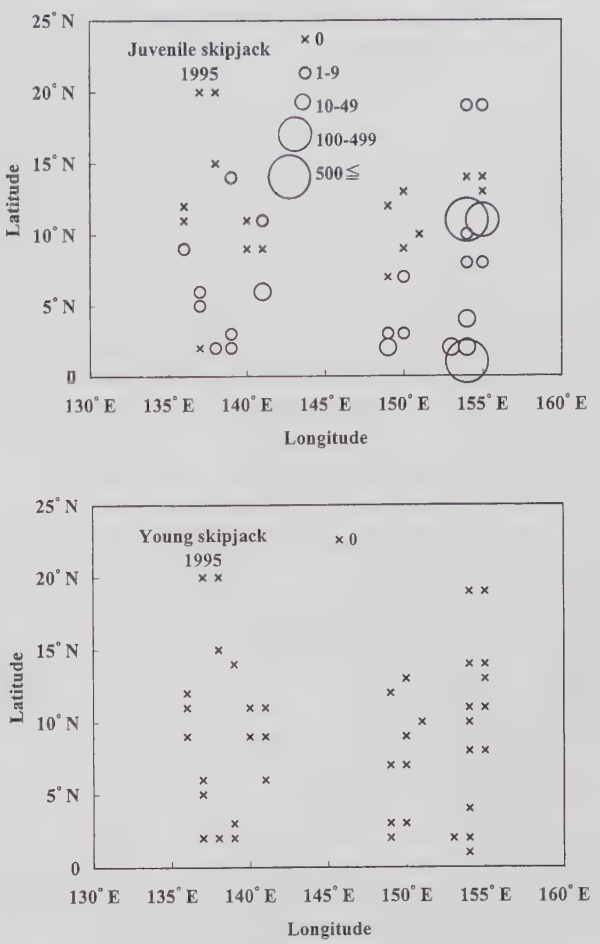
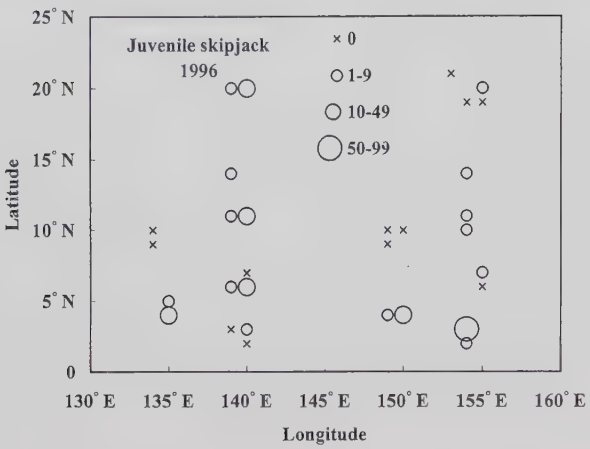


Fig. 3-7d. Horizontal distribution of juvenile (top) and young (bottom) skipjack in the tropical western Pacific from October to December 1995. Abundances of skipjack (○) at each 1×1 degree area are calculated by total number of specimens divided by number of tows. Cross (x) marks indicate negative catch.

2）カツオ稚魚および幼魚の鉛直分布

各海域におけるカツオの稚魚期から幼魚期にかけての成長と分布水深との関係を調べるために，各個体の体長と採集された水深を昼夜別にプロットした（図3－8a，b，c，d)。北赤道反流域では昼夜ともに採集されたカツオの標本数が最も多く，体長と分布水深との関係が明瞭に示されている。すなわち，稚魚への移行期に当たる体長10㎜前後では，昼夜ともに海面近くから水深200mまでの幅広い鉛直分布を示したが，体長が大きくなるにつれてごく少数の例外を除いて分布水深範囲が狭くなる傾向が見られた。特に昼間ではその傾向が明瞭に示され，体長10－40㎜では表層付近から水深220mまで出現したが，体長50－60㎜では60－140m，70－80㎜では90m付近に集中していった。夜間には昼間よりも分布水深が分散する傾向にあり，海面に近い水深40m以浅でも稚魚が多く出現するようになる。体長100㎜以上の幼魚については，第2章で述べたように中層トロール網からの逃避による影響によって夜間にしか採集されなかったため，昼間の分布水深については本研究では明らかにできなかったが，少なくとも夜間には水深50m付近を中心とした40－100mに生息していることが明らかになった。北赤道海流域では，昼間は体長10－20㎜の分布水深は表層付近から170mまででであったが，体長30－40㎜になると50－130mに狭まった。夜間には，昼間に比べて分布水深が分散して体長との関係が不明瞭であった。境界域での鉛直分布は，北赤道反流域と北赤道海流域に比べて浅く，昼間は170m以浅，夜間は130m以浅に限られた。昼間は，体長10－20㎜では30－170mに分布していたが，体長30－50㎜では30－90m，体長50－80㎜では80－90mに分布した。夜間には，体長10－30㎜では30－130mに，体長30－60㎜では50－100m，体長60－70㎜では90m付近に分布していた。



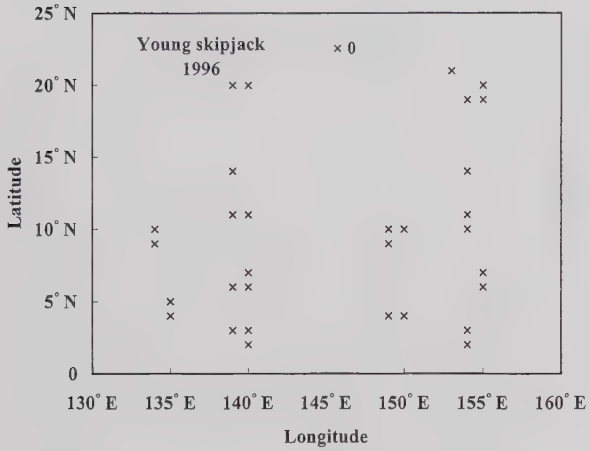
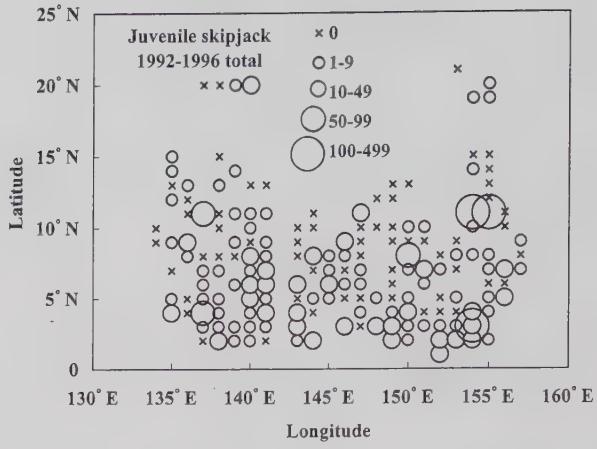


Fig. 3-7e. Horizontal distribution of juvenile (top) and young (bottom) skipjack in the tropical western Pacific from October to December 1996. Abundances of skipjack (○) at each 1×1 degree area are calculated by total number of specimens divided by number of tows. Cross (x) marks indicate negative catch.



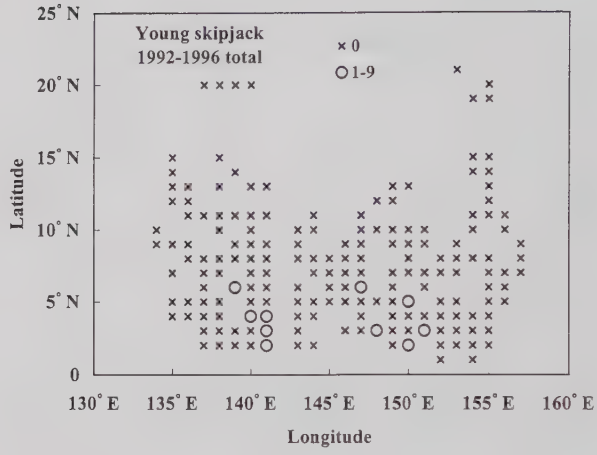
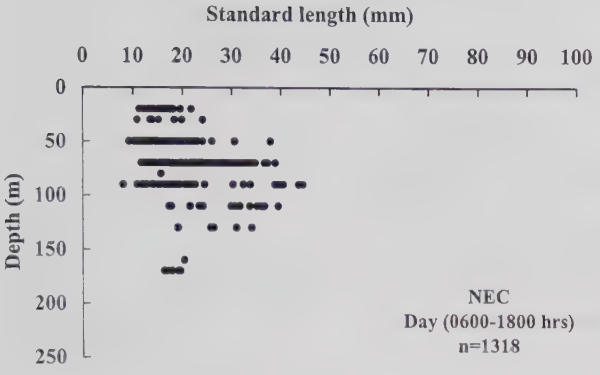


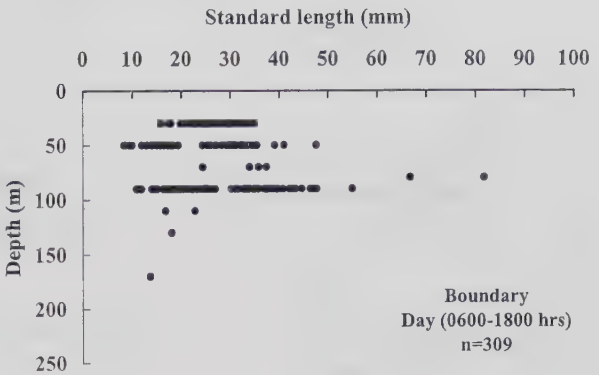
Fig. 3-7f. Horizontal distribution of juvenile (top) and young (bottom) skipjack in the tropical western Pacific from October to December 1992－1996. Abundances of skipjack (○) at each 1×1 degree area are calculated by total number of specimens divided by number of tows. Cross (x) marks indicate negative catch.

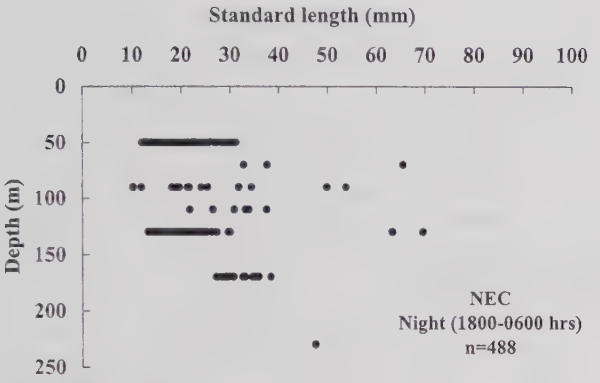
各海域におけるカツオ稚魚の鉛直分布と水温の鉛直分布との関係を調べるために，水深0－200mの範囲内において20m層ごとにカツオの1時間曳網あたり採集個体数と平均水温を比較した（図3－9）。北赤道海流域と北赤道反流域では，高水温の表層混合層が深くまで達していて水温躍層が始まる水深が70－110mであったのに対し，境界域では表層混合層が薄く水温躍層の始まりが50m付近と浅かった。カツオ稚魚の鉛直分布は，表層混合層の厚い北赤道海流域と北赤道反流域では鉛直分布密度の最大値が，それぞれ60－80mと80－100mに存在したのに対し，表層混合層の薄い境界域では40－60mに最大値が見られた。これらの結果は，表層混合層の厚さおよび水温躍層の始まる水深とカツオ稚魚の鉛直分布がよく対応していることを表している。すなわち，稚魚期のカツオは，表層混合層の下部から水温躍層の上部にあたる水深層を中心として生活しているものと解釈できる。幼魚については，採集標本数が限られていて夜間の鉛直分布データしか得られなかったが，40－80mを中心に分布していた。

3）水温・塩分とカツオ幼稚魚の分布との関係

カツオ稚魚および幼魚の分布を水温別，塩分濃度別に1時間曳網あたり採集個体数によって分布密度を示すと，図3－10および図3－11のようになった。カツオ稚魚は水温11－30℃の範囲から出現したが，1時間曳網あたり採集個体数が10個体を超えたのは20℃，23℃，27℃および28℃であったことから，カツオ稚魚にとって最も好適な生息水温は20－29℃の範囲にあると見られる。一方，カツオ稚魚は塩分濃度では33.6－35.5PSUと広い範囲にわたって出現し，1時間曳網あたり採集個体数10個体以上は33.6－33.9PSU，34.6－34.7PSU，35.2－35.3PSUであった。これらの結果から，カツオ稚魚は水温と塩分の両方の物理環境に対して幅広い適応力を備えていると判断できる。幼魚は，水温18－29℃，







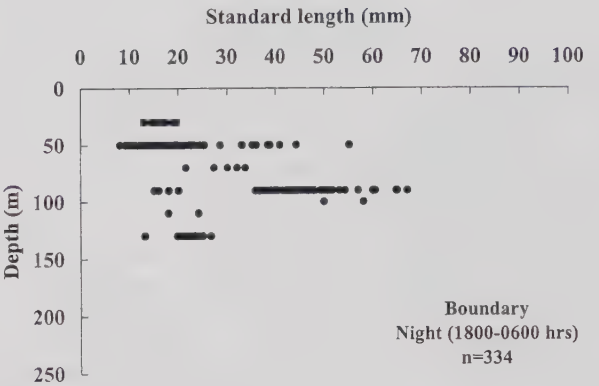


Fig. 3-8a. Changes in the distribution depth of skipjack tuna with growth in the north equatorial current (NEC) area from October to December 1992－1996.

Fig. 3-8b. Changes in the distribution depth of skipjack tuna with growth in the boundary area between the north equatorial current and the north equatorial counter current from October to December 1992－1996.

塩分34.4－35.7PSU に分布し，ピークは28℃と35.6－35.7PSU に見られた。

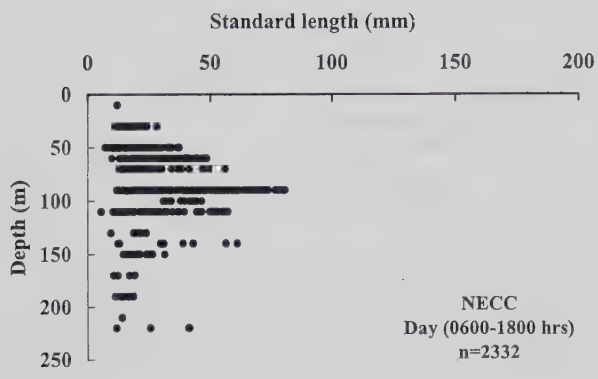
マグロ属幼稚魚の水平・鉛直分布

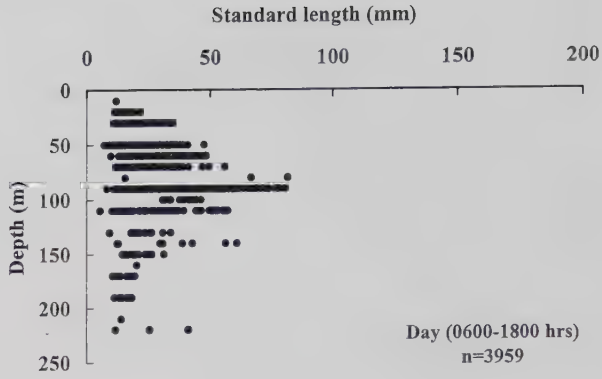
1）マグロ属稚魚および幼魚の水平分布

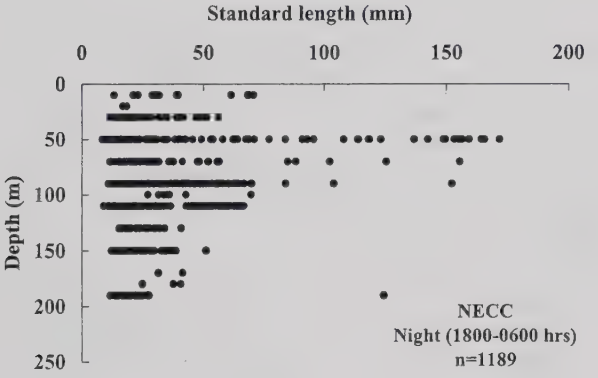
物理環境要因によって区分した海域別のマグロ属幼稚魚の水平分布を，出現率と1時間曳網あたり採集個体数により比較した（表3－2）。5年間で採集されたマグロ属稚魚の合計は1366個体で，カツオ稚魚採集個体数の20%であった。稚魚の出現率は，昼夜ともに北赤道海流域，境界域，北赤道反流域の順に北から南に向かって高くなった。北赤道反流域での稚魚の出現率は，昼間には北赤道海流域の3.3倍，境界域の1.4倍で，夜間には北赤道海流域の2.2倍，境界域の1.9倍高かった。マグロ属稚魚の出現率は，全ての海域において昼間より夜間の方が高く，昼夜の差は北赤道反流域（19.7%），北赤道海流域（14.9%），境界域（3.4%）の順に大きかった。稚魚の1時間曳網あたり採集個体数でも，出現率と同様に南側の海域ほど高くなる傾向を示した。北赤道反流域での稚魚の1時間曳網あたり採集個体数は，昼間には北赤道海流域の14.5倍（$p<0.05$），境界域の2.4倍（$p<0.05$）で，夜間には北赤道海流域の39倍（$p<0.05$），境界域の3.3倍（$p<0.05$）であった。全ての海域での1時間曳網あたり採集個体数で，夜間よりも昼間の方が有意に大きかった（$p<0.05$）。出現率，1時間曳網あたり採集個体数ともに顕著な南高北低型の水平分布となっており，本研究海域内ではマグロ属稚魚は南へ行くほど分布量が多いことが分かった。これらの結果から，マグロ属稚魚の水平分布は明らかに海域間で異なっており，少なくとも10－12月には北赤道反流域が最も重要な分布域となっていることが示唆された。

一方，マグロ属幼魚もカツオ幼魚と同様に1992年から1994年までの3年間に採集され，採集個体数は境界域での4個体と北赤道反流域での3個体，合計7個体であった。境界域と北赤道反流域におけるマグロ属幼魚の出現率，1時間曳網あたり採集個体数は同海域の稚魚と比較すると顕著に低く，この傾向はカツオの稚魚と幼魚での関係と同様である。マグロ属幼魚でも夜間にしか採集されなかったことから，成長に伴う遊泳能力の発達により昼間は漁具から逃避していた可能性が高い。

マグロ属稚魚および幼魚の水平分布を，年別に緯度・







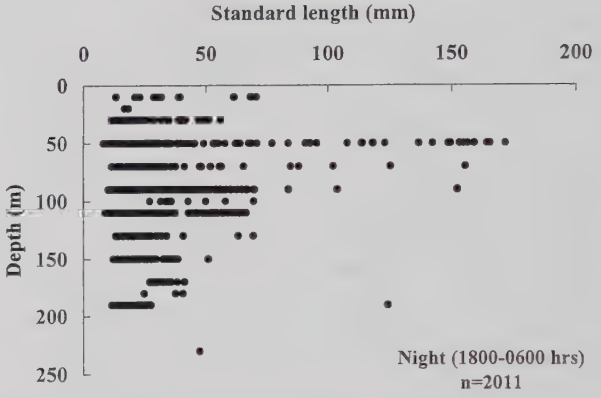


Fig. 3-8c. Changes in the distribution depth of skipjack tuna with growth in the north equatorial counter current (NECC) area from October to December 1992－1996.

Fig. 3-8d. Changes in the distribution depth of skipjack tuna with growth in the tropical western Pacific (0－20°N, 130－160°E) from October to December 1992－1996.

Table 3-2. Occurrences and densities of other tuna at daytime and night by sampling areas during October to December 1992－1996.

Daytime (0600－1800)

Areas*1	No. of tow*2	Occurrence		No. inds 1 hr tow (mean±SD)	
		Juvenile	Young	Juvenile	Young
NEC	69	11.6	0.0	0.4± 1.6	0.0
Boundary	50	28.0	0.0	2.4± 8.6	0.0
NECC	101	38.6	0.0	5.8±16.1	0.0

*1NEC : north equatorial current area ; NECC : north equatorial counter current area ; Boundary ; the area between the NEC and NECC.
*2Sampling depths were 0－300m, horizontally towed by 20m depth strata.

Night (1800－0600)

Areas*1	No. of tow*2	Occurrence		No. inds 1 hr tow (mean±SD)	
		Juvenile	Young	Juvenile	Young
NEC	68	26.5	0.0	0.1± 0.4	0.0
Boundary	70	31.4	0.0	1.2± 5.4	0.06±0.48
NECC	139	58.3	8.6	3.9±16.5	0.02±0.15

*1NEC : north equatorial current area ; NECC : north equatorial counter current area ; Boundary ; the area between the NEC and NECC.
*2Sampling depths were 0－300m, horizontally towed by 20m depth strata.

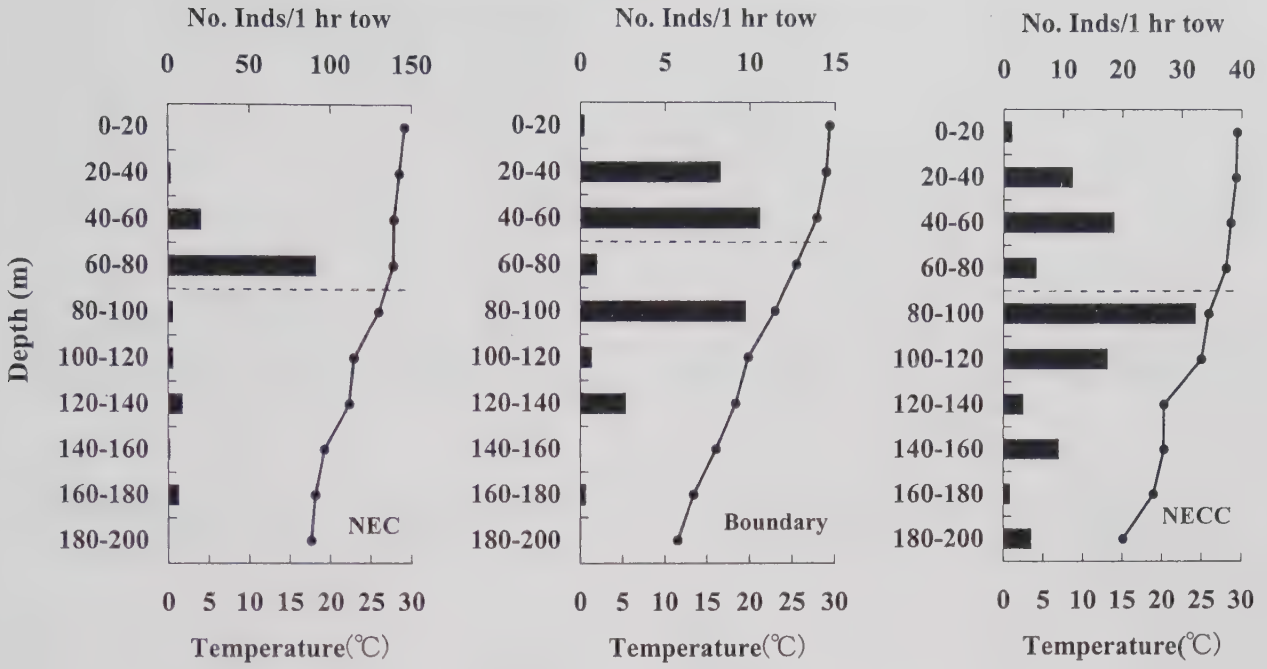
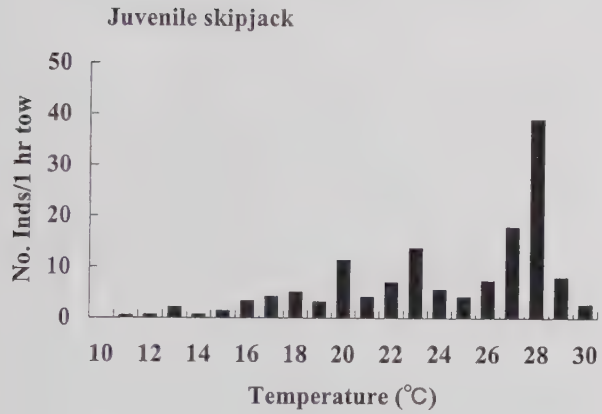


Fig. 3-9. Relationship between vertical distribution of juvenile skipjack (■) and mean temperature of each depth (●) in the north equatorial current (NEC), the boundary, and the north equatorial counter current (NECC) areas from October to December 1992－1996. Broken lines indicate the estimated maximum depth of the thermocline.



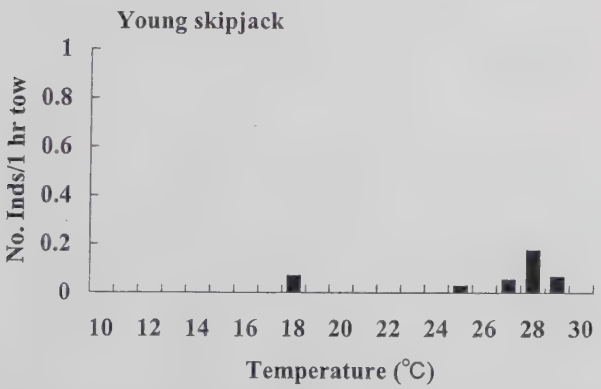
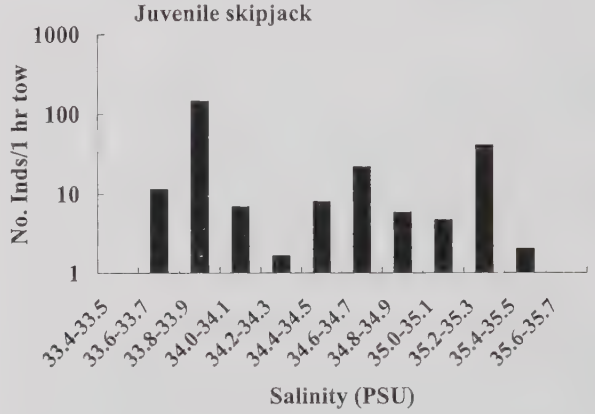


Fig. 3-10. Distribution of density for juvenile (top) and young (bottom) skipjack by temperature of the sampling depth in the tropical western Pacific (0－20°N, 130－160°E) from October to December 1992－1996.



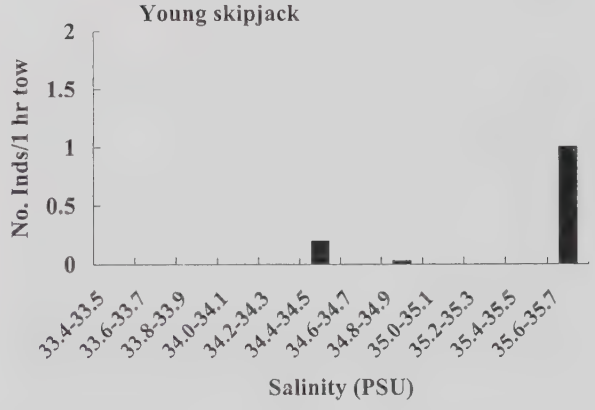
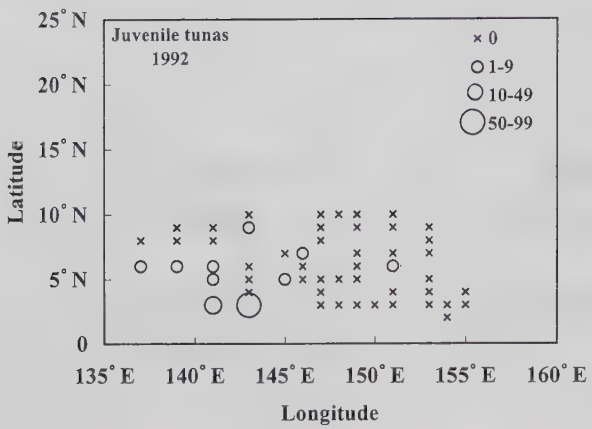


Fig. 3-11. Distribution of density for juvenile (top) and young (bottom) skipjack by salinity level of the sampling depth in the tropical western Pacific (0－20°N, 130－160°E) from October to December 1992－1996.



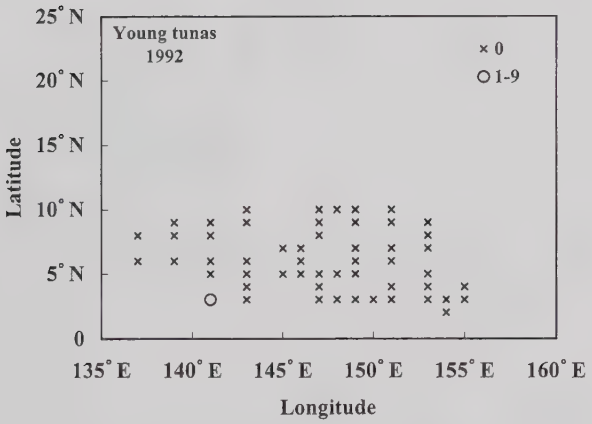
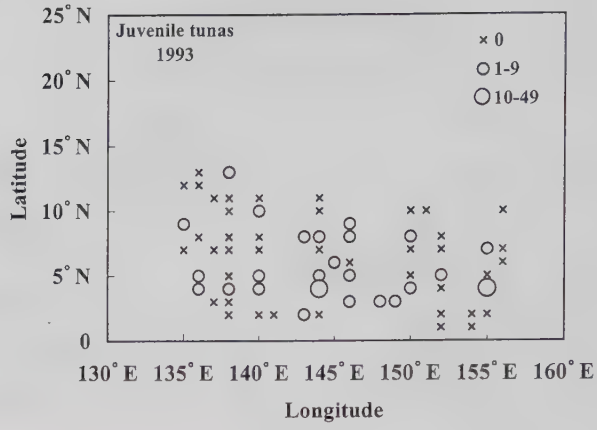


Fig. 3-12a. Horizontal distribution of other juvenile (top) and young (bottom) tuna in the tropical western Pacific from October to December 1992. Abundances of other tuna (○) at each 1×1 degree area are calculated by total number of specimens divided by number of tows. Cross (x) marks indicate negative catch.



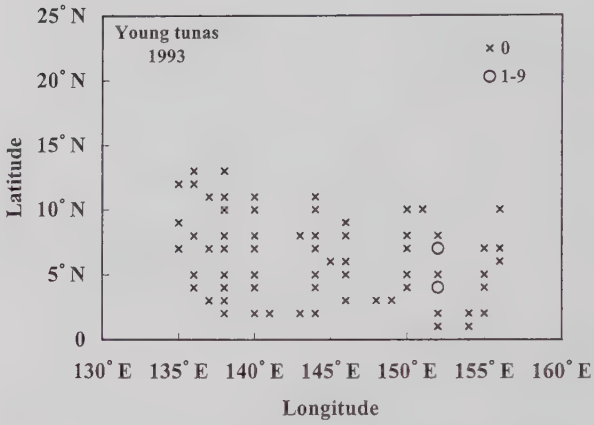
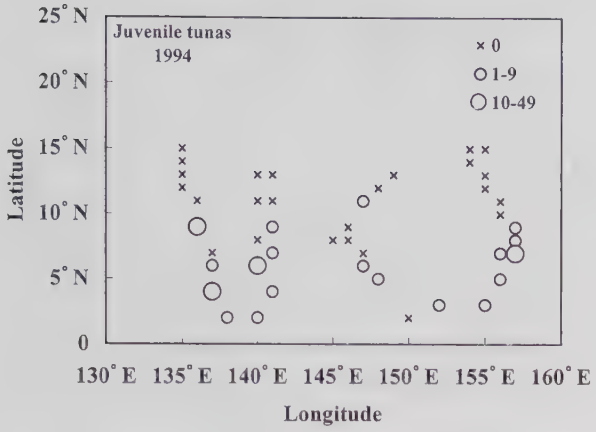


Fig. 3-12b. Horizontal distribution of other juvenile (top) and young (bottom) tuna in the tropical western Pacific from October to December 1993. Abundances of other tuna (○) at each 1×1 degree area are calculated by total number of specimens divided by number of tows. Cross (x) marks indicate negative catch.

経度1度ごとの1時間曳網あたり採集個体数によって示した（図3－12a, b, c, d, e, f)。調査海域内での稚魚の分布は,年によって異なる特徴を示した。1992年には西南海域に多く,3°N141－143°E で最も分布密度が高かったが,147－155°E の東側海域では，稚魚の分布域は1点（6°N151°E)を除いて出現しなかった。幼魚の分布域は，3°N141°E に見られた。1993年の稚魚の分布は，東西方向および南北方向での海域的な偏りが少なく，調査海域内で広範囲に拡がっていた。分布密度では，4°N144°E と 4°N155°E の10－49個体が最大で,50個体以上の点は出現しなかった。幼魚の分布域は，東側海域の4°N152°E と 7°N152°E の2点であった。1994年には，稚魚の分布域は南北方向での違いが顕著に見られ，10°N 以北に少なく，9°N 以南の海域で多かった。幼魚の分布は，3°N155°E の1点だけであった。1995年の稚魚の分布は,東西方向での密度の違いが顕著に現れた。最も東側の153－155°E には多く分布し,136－141°E では散発的な分布を示した。1996年の稚魚の分布域は，東西および南北での違いが明瞭ではなく，全体の海域にわたって密度50個体未満の低い点が散在した。各年における海域的な分布パターンは，カツオ稚魚とマグロ属稚魚との間で類似していた。

2）マグロ属稚魚および幼魚の鉛直分布

海域ごとのマグロ属幼稚魚の体長と分布水深との関係を昼夜別にプロットした（図3－13a, b, c, d)。最も採集個体数の多かった北赤道反流域では，稚魚は昼夜とも100m以浅に多かったが，成長に伴って分布水深が変化する傾向が見られた。体長10－30㎜の稚魚は，昼間は表層付近から水深220m付近まで，夜間には表層付近から190mまで分布していた。体長40－60㎜になると,昼間は30－90mまで,夜間は表層付近から110mまでの分布となった。昼間に比べて夜間の方が標本の



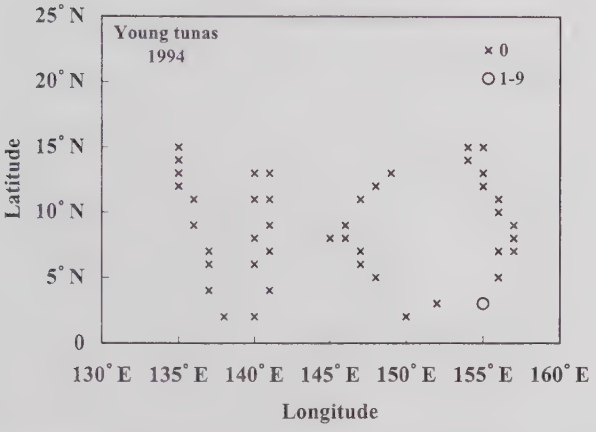
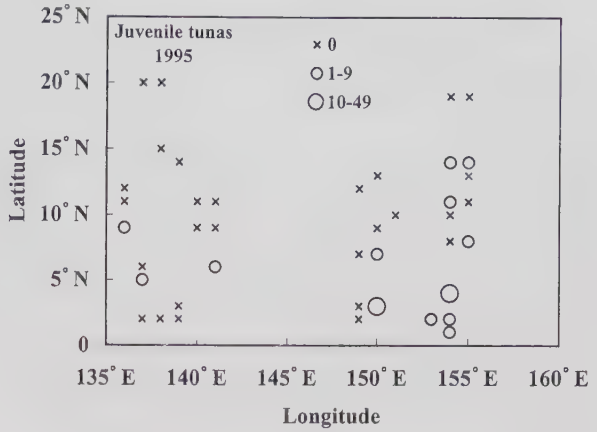


Fig. 3-12c. Horizontal distribution of other juvenile (top) and young (bottom) tuna in the tropical western Pacific from October to December 1994. Abundances of other tuna (○) at each 1×1 degree are area calculated by total number of specimens divided by number of tows. Cross (x) marks indicate negative catch.



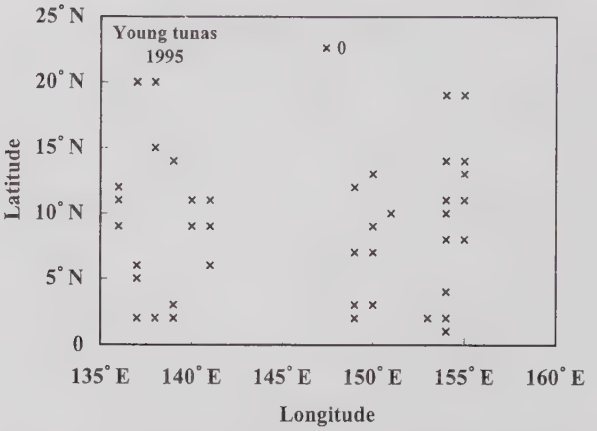


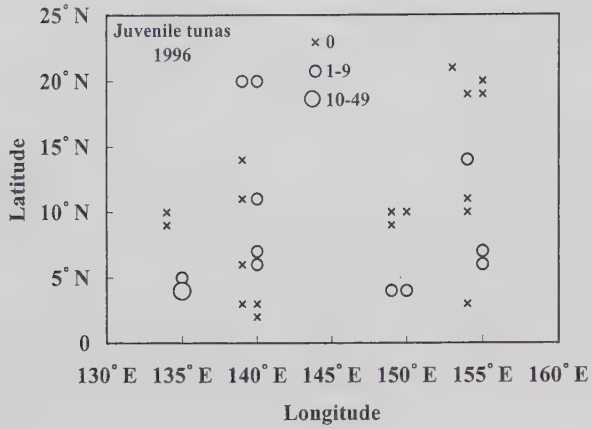
Fig. 3-12d. Horizontal distribution of other juvenile (top) and young (bottom) tuna in the tropical western Pacific from October to December 1995. Abundances of other tuna (○) at each 1×1 degree area are calculated by total number of specimens divided by number of tows. Cross (x) marks indicate negative catch.

体長範囲が広く，成長に伴う分布水深の変化がより明瞭に現れている。幼魚のデータは少ないが，夜間10m，50m，70mでそれぞれ1個体が出現した。境界域では，全ての体長範囲の個体が昼間は110m以浅，夜間は90m以浅に分布し，北赤道反流域よりも分布水深が浅かった。幼魚は，全ての個体が夜間50m付近に分布していた。北赤道海流域では最もデータ数が少なかったため，体長と分布水深との関係を読みとることが困難であった。

各海域におけるマグロ属稚魚の20m層ごとの1時間曳網あたり採集個体数と平均水温を比較した（図3－14)。マグロ属稚魚の鉛直分布の中心は，北赤道反流域では0－20m層と40－60m層，境界域では40－60m層にあり，北赤道海流域では20－40m層が最も多かった。これら3海域での鉛直分布密度の最大値は，マグロ属稚魚では表層混合層の厚さおよび水温躍層の深さと対応せず，どの海域でも分布密度の高い層は60m以浅に存在した。しかしながら，北赤道海流域や北赤道反流域に比べて水温躍層の浅い境界域では，120m以深からは稚魚が出現しなかったのに対し，北赤道海流域と北赤道反流域では120－200mでも稚魚が出現したことから，水温の高い海域ではマグロ属稚魚もより深い層まで分布できることが明らかになった。

3）水温・塩分との関係

図3－15，16にマグロ属稚魚および幼魚の分布密度を水温別，塩分濃度別に1時間曳網あたり採集個体数として示した。稚魚では水温12－30℃の範囲に出現したが，26℃以上に多く分布し，水温が高くなるほど分布密度も高くなった。25℃以下では分布密度が低く，稚魚が高水温性で温度の高い環境を好んで分布していることが分かる。これとは対照的に，塩分濃度では低塩分ほど稚魚の分布密度が高くなる傾向が見られ，塩分濃度33.6－33.7PSUで最も分布密度が高く，これよりも塩分濃度が高くなると分布密度が低下し，35.4PSU以上では出現しなかった。これらの結果は，マグロ属



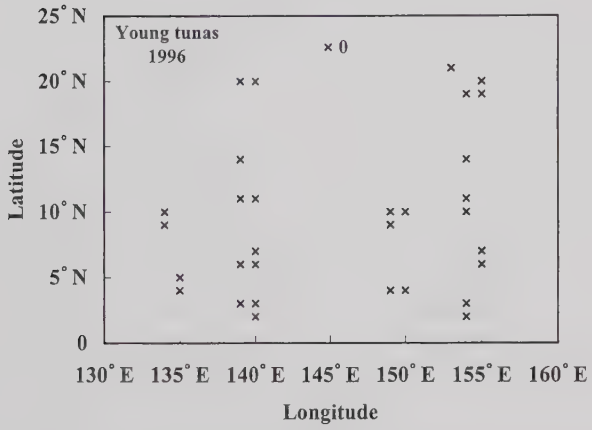
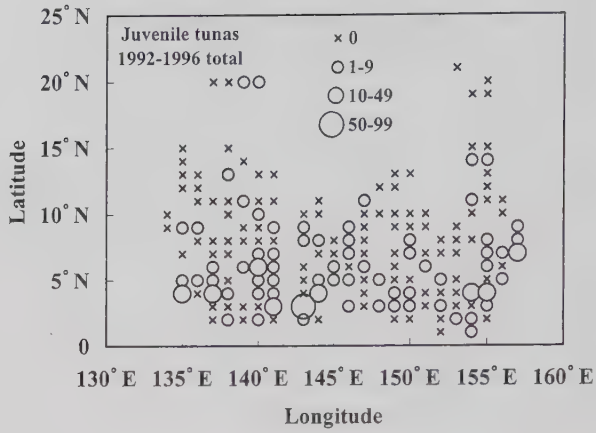


Fig. 3-12e. Horizontal distribution of other juvenile (top) and young (bottom) tuna in the tropical western Pacific from October to December 1996. Abundances of other tuna (○) at each 1×1 degree area are calculated by total number of specimens divided by number of tows. Cross (x) marks indicate negative catch.



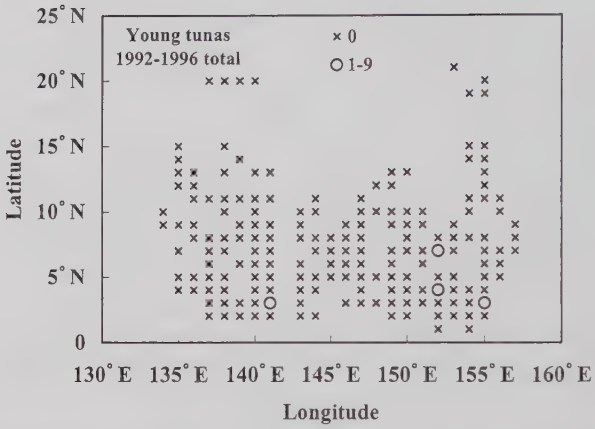
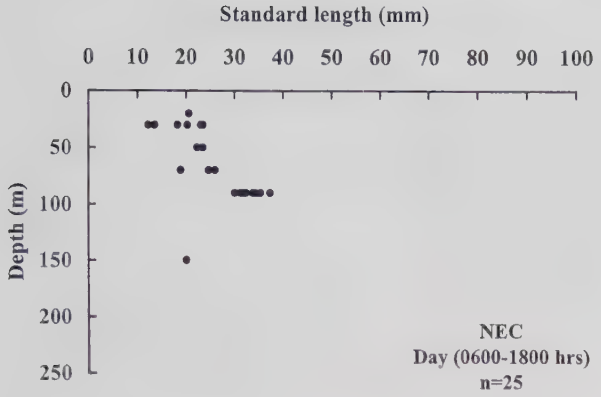


Fig. 3-12f. Horizontal distribution of other juvenile (top) and young (bottom) tuna in the tropical western Pacific from October to December 1992－1996. Abundances of other tuna (○) at each 1×1 degree area are calculated by total number of specimens divided by number of tows. Cross (x) marks indicate negative catch.

稚魚が高水温・低塩分である熱帯の表層近くを主な分布域としていることを表しており，カツオ稚魚が水温・塩分に対して幅広い分布を示した点とは対照的で，両者の水温・塩分に対する指向性の違いは注目に値する。マグロ属幼魚は，水温27－29℃，塩分濃度34.4－34.5PSUに分布していた。

その他の採集生物の生物量とカツオ・マグロ類稚魚の出現状況

カツオ稚魚の水平・鉛直分布と中層トロールによって採集された全ての生物の生物量水平・鉛直分布との関係を調べる目的で，海域別1時間曳網あたり採集湿重量（図3－17），緯度・経度1度ごとの1時間曳網あたり採集湿重量（図3－18），水深別1時間曳網あたり採集湿重量（図3－19）を示した。中層トロールによって採集されたカツオ・マグロ類以外の生物は，昼間はカタクチイワシ科，ニザダイ科，アジ科を中心とした魚類が多く，夜間にはハダカイワシ科，ヨコエソ科，クロタチカマス科を中心とした魚類に加え，トビイカ類を中心としたイカ類，オキアミ類を中心とした甲殻類が多かった。海域別の全生物量（バイオマス）を比較した結果，北赤道反流域と境界域では生物量が多く，北赤道海流域ではこれらの海域の50%と少なかった（図3－17）。緯度・経度1度ごとのバイオマスの水平分布においても，1時間曳網あたり採集湿重量5－9.9kgおよび10kg以上の点は，北赤道反流域から境界域に含まれる2－7°Nに多かった（図3－18）。一方，1時間曳網あたり採集湿重量0.1kg未満および0.1－0.9kgの点は，9°N以北に多く出現した。バイオマスの鉛直分布を見ると，昼間は北赤道海流域と境界域では40－80mに，北赤道反流域では80－120mにおいて分布密度が最も高く，夜間には北赤道反流域と境界域では80－120mに，北赤道海流域では80－120mと120－200mにピークを示した（図3－19）。各水深層でのカツオ稚魚の分布密度とバイオマスとの関係を調べたところ，昼間のカツオの鉛直分布とバイオマスの鉛直



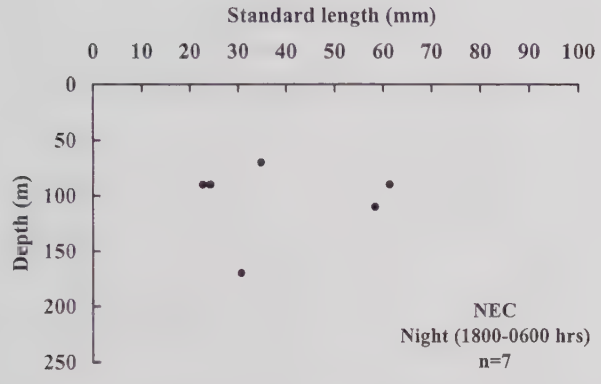
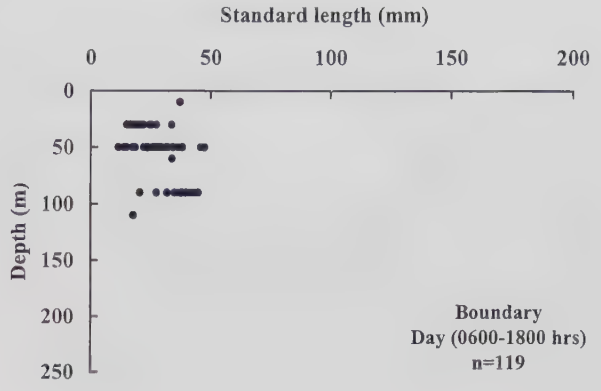


Fig. 3-13a. Changes in the distribution depth of other tuna with growth in the north equatorial current (NEC) area from October to December 1992－1996.



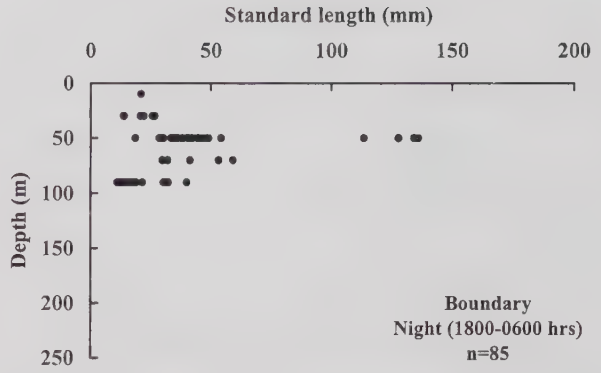


Fig. 3-13b. Changes in the distribution depth of other tuna with growth in the boundary area between the north equatorial current and the north equatorial counter current from October to December 1992－1996.

分布の間には高い相関が得られ，夜間にも決定係数は高くないものの一次直線的な関係が見られたことにより，カツオは生物量の多い水深に分布していることが分かった（図３－20）。これに対して，各水深層でのマグロ属稚魚の分布密度とバイオマスの鉛直分布との関係では相関が低く，マグロ属の鉛直分布はバイオマスの鉛直分布とは異なっていた（図３－21）。

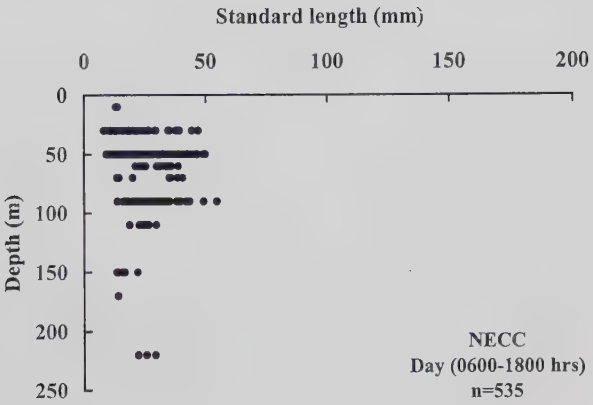
考　　察

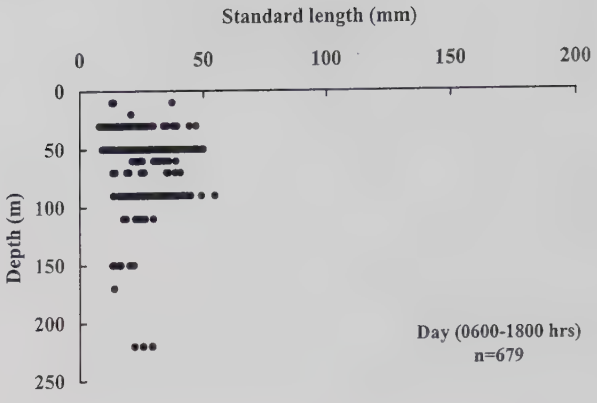
西部太平洋の熱帯外洋域におけるカツオ稚魚および幼魚の分布

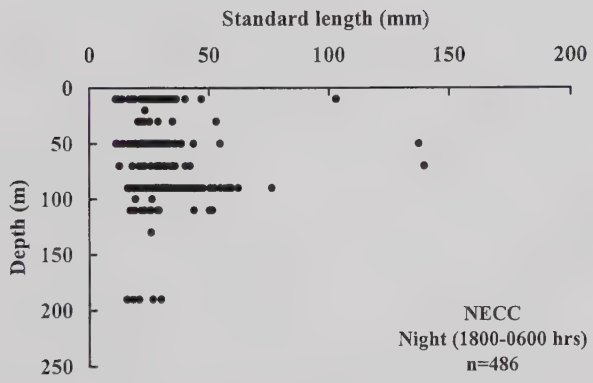
５年間の調査結果をもとにカツオ幼稚魚の水平分布を調べた結果により，パラオ・ミクロネシア周辺の西部太平洋熱帯海域では，少なくとも10－12月期にはカツオ稚魚がほぼ全域にわたって出現したことから，カツオが稚魚期においてこの海域全体を生息域として利用しているものと推定された。稚魚ネットによって採集されたカツオ仔魚の季節別分布によれば（西川ら1985），仔魚期におけるカツオの分布は西部太平洋熱帯海域全体に広がっており，本種の産卵場の広さを示すとともに，本研究により新たに幼稚魚の分布に関する知見が得られたことにより，ふ化後から仔魚期，稚魚期を経て幼魚期に至るまでの生活史段階をこの海域で過ごしていることが明らかになった。これまでの知見では，マグロ・カジキ類の胃内容物としてのカツオ幼稚魚の出現状況や断片的な採集結果をもとにカツオの稚魚期から幼魚期にかけての分布が推測されていたが（森　1972），本研究結果によってこれらが実際に確認された。西部太平洋熱帯海域内で生まれたカツオは，幼魚期までをここで過ごした後，どの段階で大規模な魚群を形成し中緯度方向への回遊行動を初めるのであろうか。このことはカツオの生態研究としてだけでなく，資源学的側面からも加入にいたる生物過程を明らかにする上で重要である。本研究結果から資源への加入機構を明らかにすることは困難であるが，カツオの稚魚期から幼魚期にかけての分布生態を詳しく調べることにより，生態学的側面からの一助に成り得ると考えられる。

幼稚魚の分布と海洋環境要因との関係

本研究の対象となった海域を物理的に分類すると北







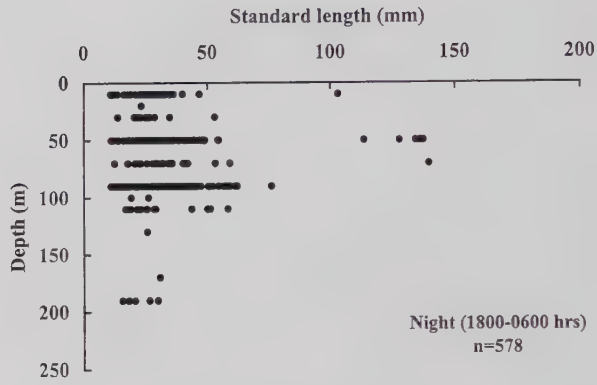


Fig. 3-13c. Changes in the distribution depth of other tuna with growth in the north equatorial counter current (NECC) area from October to December 1992－1996.

Fig. 3-13d. Changes in the distribution depth of other tuna with growth in the tropical western Pacific (0－20°N, 130－160°E) from October to December 1992－1996.

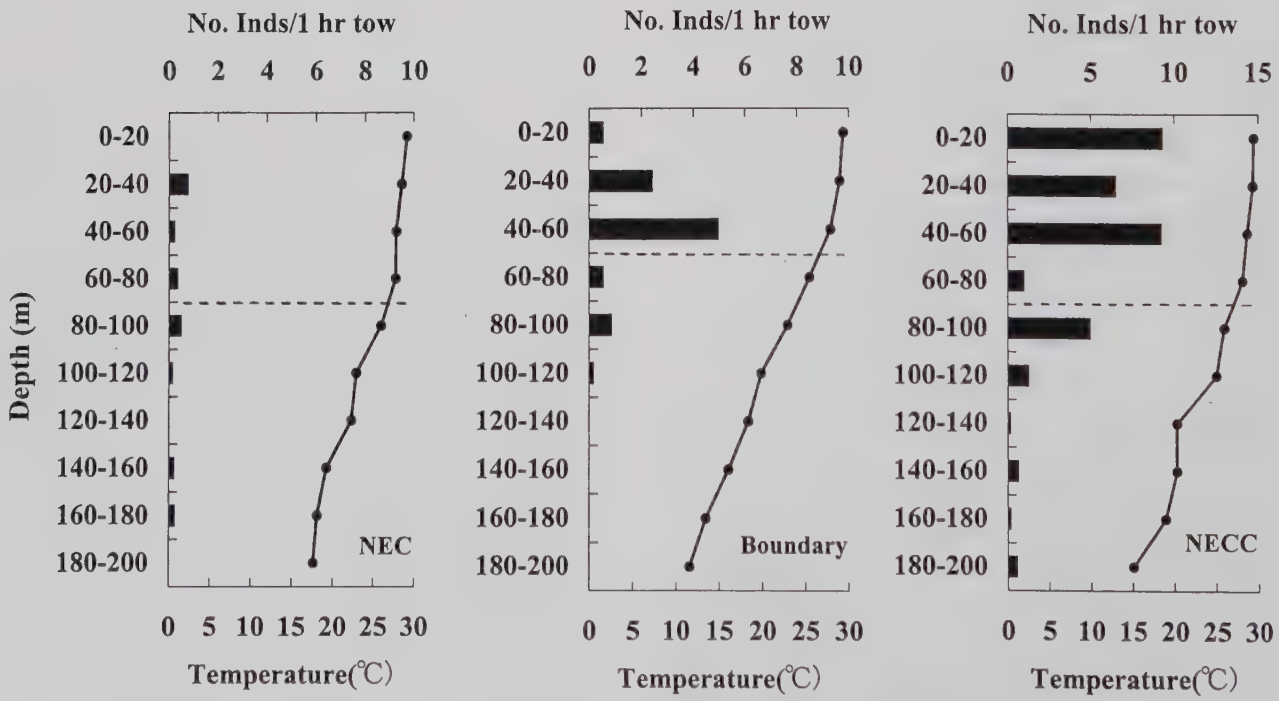


Fig. 3-14. Relationship between vertical distribution of other juvenile tuna (■) and mean temperature of each depth (●) in the north equatorial current (NEC), the boundary, and the north equatorial counter current (NECC) areas from October to December 1992－1996. Broken lines indicate the estimated maximum depth of the thermocline.

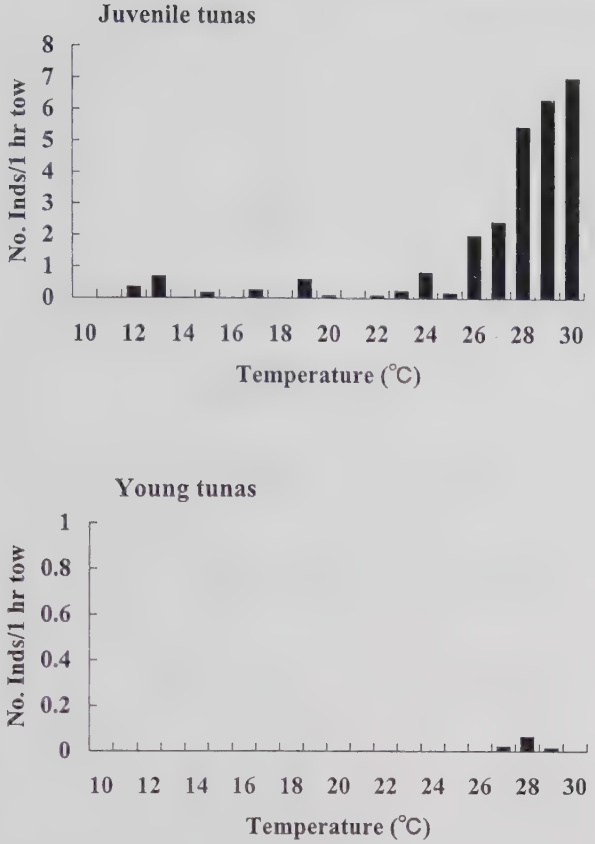


Fig. 3-15. Distribution of density for other juvenile (top) and young (bottom) tuna by temperature of the sampling depth in the tropical western Pacific (0－20°N, 130－160°E) from October to December 1992－1996.

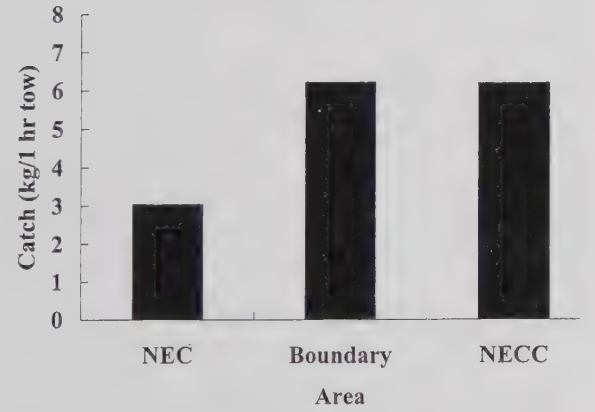


Fig. 3-17. Distribution of density for total samples collected by the midwater trawl net in the north equatorial current (NEC), the boundary, and the north equatorial counter current (NECC) areas from October to December 1992－1996.

赤道海流域，北赤道反流域，これらの境界域に分けられる。それぞれの特徴は，北赤道海流域と北赤道反流域では表層混合層が水深80－100mに達し水温躍層の始まる水深が深かったことと，塩分濃度も水深40－80m以深では相対的に高かったのに対し，境界域では赤

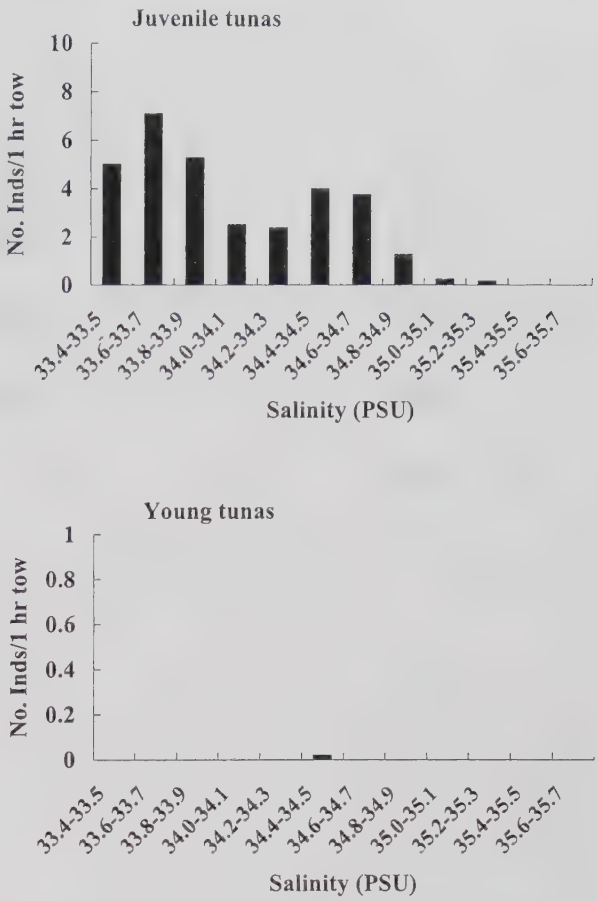


Fig. 3-16. Distribution of density for other juvenile (top) and young (bottom) tuna by salinity level of the sampling depth in the tropical western Pacific (0－20°N, 130－160°E) from October to December 1992－1996.

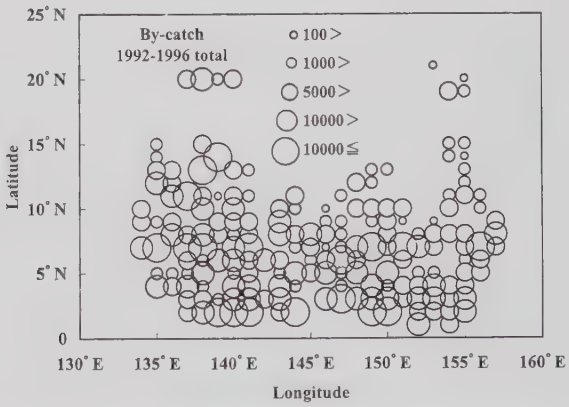


Fig. 3-18. Horizontal distribution of total samples collected by the midwater trawl net in the tropical western Pacific (0－20°N, 130－160°E) from October to December 1992－1996. Abundances (○) at each 1×1 degree area are calculated by total wet weight of samples divided by number of tows.

道湧昇の影響により表層混合層が40－60mまでと浅い上に塩分濃度も相対的に低かったことから，北赤道海流域と北赤道反流域では高水温・高塩分，境界域では

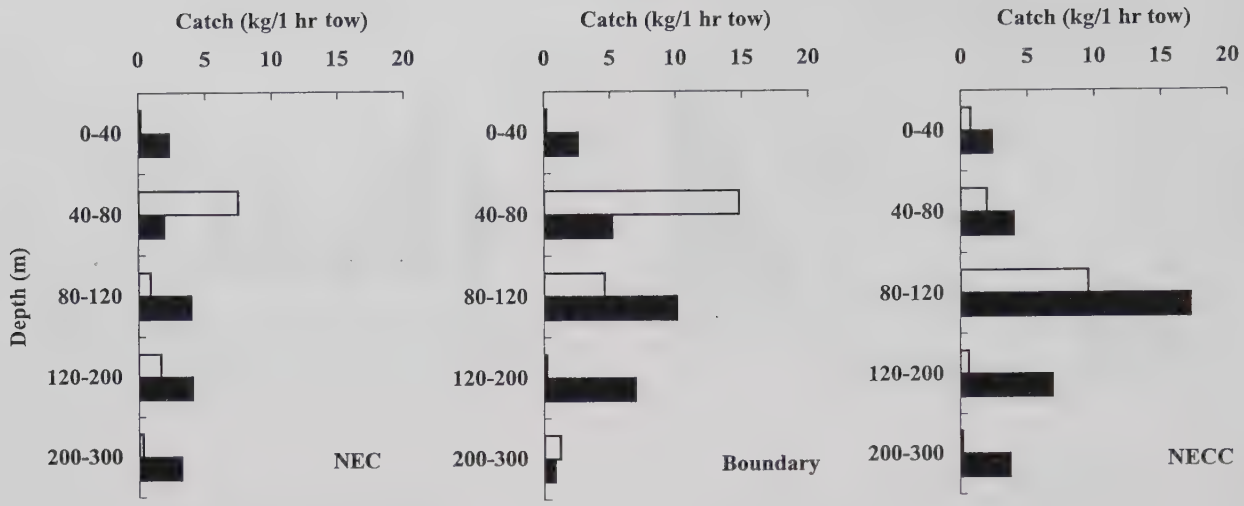


Fig. 3-19. Vertical distribution of total samples collected by the midwater trawl net for daytime (□) and night (■) in the north equatorial current (NEC), the boundary, and the north equatorial counter current (NECC) areas from October to December 1992－1996.

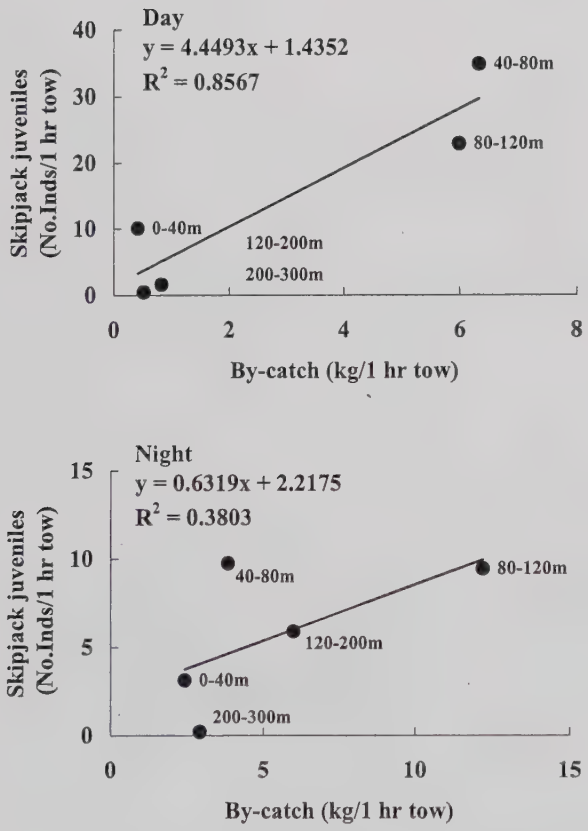


Fig. 3-20. Relationship for vertical distributions between juvenile skipjack and total samples collected by the midwater trawl net in the tropical western Pacific (0－20°N, 130－160°E) from October to December 1992－1996.

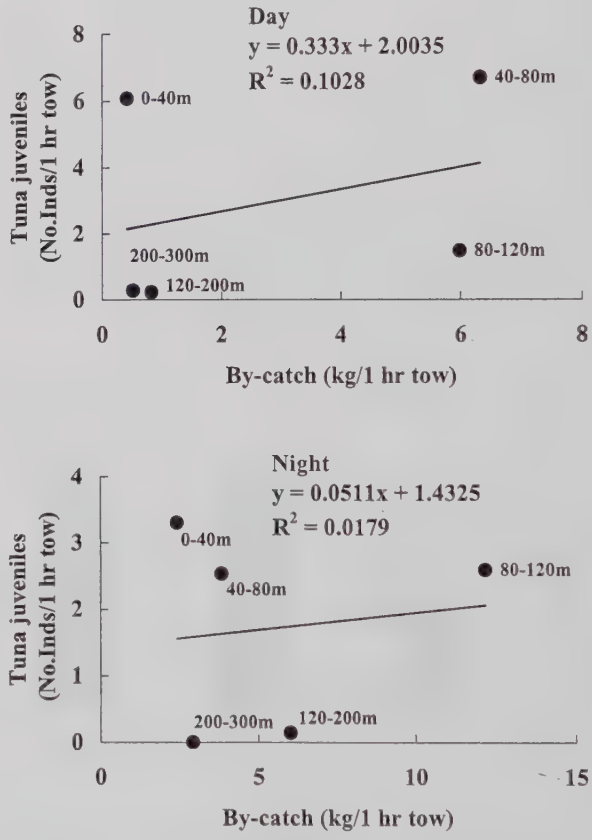


Fig. 3-21. Relationship for vertical distributions between other juvenile tuna and total samples collected by the midwater trawl net in the tropical western Pacific (0－20°N, 130－160°E) from October to December 1992－1996.

低水温・低塩分と特徴付けられた。それぞれの海域は，カツオの稚魚期から幼魚期にかけての生息場所としてどのような意味をもつのであろうか。本研究結果から見る限り，カツオの幼稚魚は西部太平洋熱帯域全体に広がるほどの広大な分布域を示すものの，出現率と1曳網当たり採集個体数を海域間で比較した結果から，分布密度は北赤道反流域で最も高いと考えられた。このことはカツオ幼稚魚だけでなく近縁のマグロ属幼稚

魚を含めて生物量全体の分布密度にも当てはまることから，赤道より北側の熱帯外洋表層域内では北赤道反流域と境界域で生物生産力が高く，温帯域に比べて貧栄養とされる熱帯域内においても海域によって相対的な生物生産力が違うことが示唆された。北赤道反流域は，高水温・高塩分・富栄養の環境条件がカツオ稚魚の分布にとって有利に働くため，他の海域に比べて多くの稚魚群が生息していたと考えられる。北赤道海流域も高水温・高塩分であるが，栄養塩類が北赤道反流域よりも少ないためにカツオ稚魚の餌生物が乏しいことから（Reid Jr. 1962），境界域に近い南縁海域では高密度の稚魚群が分布する場合もあるが，全体としては北赤道反流域よりも不利な環境条件にあってカツオ稚魚の分布は散発的である。境界域では湧昇流による下層からの栄養供給という有利な環境条件を備える一方，水温躍層の上層への張り出しによって他の海域と比較して低水温という不利な環境条件も併せもつため，カツオ稚魚の分布にとってあまり好適な環境とは言えず，分布域が限られている上に分布密度も低いと考えられる。

幼魚は稚魚に比べて遊泳能力がより発達した段階にあるため，積極的に好適な分布域を選択するとすれば物理・餌生物環境面で有利な北赤道海反流域でのみ幼魚が採集されたことは理解できる。しかしながら，稚魚は北赤道海流域や境界域にも分布しており，幼魚がこれらの海域に分布していなかった点については，稚魚期から幼魚期への成長に伴って北赤道反流域に移動したか，これらの海域にも分布するが北赤道反流域に比べて分布密度が低いために採集されなかった可能性がある。いずれにせよ，カツオの幼魚期における分布量は，北赤道海流域や境界域に比べて北赤道反流域の方が多いと考えられる。

カツオ幼稚魚を中心とした生物の鉛直分布と水温・塩分の鉛直分布との関係から，表層混合層の下部から水温躍層上部がカツオにとって最も分布密度が高い層であり，マグロ属を除く他の生物全体にとってもこの水深層で生物量が多かった。このことは鉛直分布においても水深層によって分布密度が違うこと，すなわちカツオにとって生活しやすい分布水深が存在していることを示しているとともに，カツオが他の魚類や頭足類，甲殻類とも鉛直的に同じ分布層で生活していることを示している。カツオ幼稚魚と餌生物の分布との関係については第4章の摂餌生態において詳しく述べるが，カツオの鉛直分布も餌となる生物の分布層と関連していることが推察できる。この水深層では，湧昇による下層からの栄養塩類の供給を受けるため，植物プランクトンから始まる食物連鎖を通じて相対的に生物量が多くなっていると考えられる。一方，表層混合層の上部では，最も高水温で栄養塩類の消費が激しく栄養枯渇状態となるため，カツオ稚魚にとっても好適な生息環境にはないと考えられる。水温躍層の下部では，下層ほど栄養塩類は豊富であるが水温が低すぎるために，カツオにとって不適な生息環境である。

カツオと熱帯性マグロ類の分布の違い

カツオの分布域の広さはマグロ類の中でも最大規模を誇るとともに，漁獲量から推定される資源量もマグロ類の中では最大と考えられる。このことは，本研究によって明らかになったカツオとマグロ属の幼稚魚における分布域と海洋環境との関係からも説明することができる。すなわち，カツオ幼稚魚の分布域における水温・塩分範囲はマグロ属に比べて幅広く，カツオの方がマグロ属よりも温度と塩分の両方の物理環境に対してより広く対応できることが示されたことにより，カツオは稚魚期から広い環境適応力を備え，マグロ属よりも広い海域で生活することが可能となったと考えられる。海洋環境に対してより広い範囲で適応できることは，分布域を拡大する上で有利と考えられ，カツオが他のマグロ類に比べて分布域が広く，個体数を増大させることにつながったのではないだろうか。海面に近い0－40m層では，下層から供給された栄養塩類が強い日射と高水温での活発な生物活動を通じて急速に消費されるため，貧栄養な熱帯外洋表層域の中でも最も栄養条件の劣悪な環境にある。カツオと同じ高度回遊性魚類に属するマグロ属の稚魚が，あえてこのような厳しい条件の水深層を中心として生活していることは，彼らの生態を明らかにしていく上で特筆すべき点である。マグロ属がなぜカツオよりも浅い水深層で生活しているのかという点については明らかにされていないが，仔魚期においてもこれと同じ鉛直分布関係があることが報告されており，カツオとマグロ属との初期生活史における分布生態の違いを示している。カツオでは生活史初期において鰾が消失するが，キハダやメバチでは鰾が成魚期でも確認できることから，鰾の有無による比重の違いが関与しているのかもしれない。

熱帯外洋域におけるカツオ幼稚魚の分布と生態戦略

カツオの分布水深と体長との関係から，稚魚期から幼魚期にかけての体成長に伴う遊泳能力の発達により，生息域を積極的に選択しながら生活していることが示唆された。魚類の中でも卓越した遊泳能力を備えるカツオは，稚魚期から幼魚期にかけて遊泳能力を急速に発達させることにより，餌生物の捕食と捕食者からの逃避という2つの行動において有利となり，個々の生き残る確率を高くすることができると考えられ

る。第2章でも述べたように，体長100㎜を越えて幼魚期に入ったカツオを捕獲することは，曳網速度5ノットの高速型大規模中層トロール網を使用しても決して容易ではなく，このことはカツオ幼魚の逃避能力がいかに高いものであるかを端的に表している。カツオはこのように高い遊泳力を持つことにより，大規模な魚群を形成しながら幼魚期から未成魚期にかけて回遊行動を開始し，親潮と黒潮が混合する三陸沖漁場のような餌の豊富な中緯度海域を目指して，数千キロにも及ぶ長距離を北上移動してくるのであろう。カツオの生活史における高度な遊泳能力の獲得は，貧栄養とされる熱帯の外洋域から富栄養な日本近海域への索餌回遊を可能とし，その結果西部太平洋では南北40度にも及ぶ分布域の拡大に成功したと考えられる。

カツオの親魚が西部太平洋熱帯域の外洋表層域を主要な産卵場として利用し，仔魚期から幼魚期にかけてこの海域で生活することは，本種の生態においてどのような意義があるのだろうか。本研究で得られた海洋観測結果から，熱帯の外洋表層域は高水温であるとともに海流の流れも単純で，海洋環境としては比較的季節変動が小さく，年間を通じての安定性が高いと考えられる。環境変動が小さいことは，カツオの幼稚魚が一定の海洋環境の中で生活できることを意味し，摂餌の面からも餌生物の安定供給をもたらすことにより，初期成長や生き残りにとっても有利に作用すると考えられる。摂餌生態と初期成長についてはこの後の第4章と第5章で詳しく述べるが，カツオの稚魚期から幼魚期にかけての分布生態における特性は，種としての生き残り戦略を考える上でも重要である。カツオが周年安定的な環境である低緯度域を産卵場とし，餌の豊富な中緯度域を索餌場として，強力な遊泳能力をもとにこの海域間を回遊しながら生活していることは，生活史の各段階において巧みに海洋環境を利用する適応能力を身につけることができた結果と考えられる。

第4章　摂餌生態

魚類の初期生活史研究において摂餌生態を明らかにすることは，種としての生活史戦略を理解する上で重要である。摂餌生態は，第3章で明らかになった分布生態と密接に関連しているとともに，第5章で記述する初期成長様式の決定要因としても重要である。摂餌生態を明らかにすることにより，カツオの初期生活史における生き残り戦略を浮き彫りにし，資源への加入機構を解明するための鍵を得ることができると考えられる。

第3章で記述したように，カツオ稚魚は西部太平洋の熱帯外洋域では水深40－120mの表層混合層下部から水温躍層上部を中心に分布しており，この層はTANSYU型中層トロールによって採集された総生物量が最も多い水深と一致していた。このことは，カツオ稚魚が餌生物だけでなく捕食者とも鉛直的な分布域が重なることを意味する。この海域の物理環境は，北東貿易風，東西方向での単純な海流系，高温の表層水によって特徴付けられ，これらの季節的・経年的変動幅が比較的少ないことにより，生息域としては常に安定した環境条件が保証されている。しかしながら，強い日射を背景とした高水温下での活発な生物生産活動により栄養塩類の消費が激しいため，特に表層では栄養塩が枯渇状態となっている。このような生息環境の中で，カツオはどのように適応し，どのような初期生活史を送っているのだろうか。食性や摂餌行動などの摂餌生態からのアプローチは，この課題への答えを導き出す有効な手段に成り得ると考えられる。

研究史に述べた如く，カツオの摂餌生態に関する研究の多くは仔魚期または成魚期の報告に限られており，稚魚期の摂餌生態についてはわずかの報告しかなされていない。本種の食性の特徴として，近縁種のビンナガやミナミマグロよりも魚食性の発現時期が早いこと，仔魚期から稚魚期にかけて餌生物としての魚類仔魚への依存度が高くなることが報告されているのみである（西川　1975，Young and Davis　1990）。本章では，カツオ稚魚の摂餌生態を明らかにするために，西部太平洋の熱帯外洋域で採集した標本を用いて胃内容物分析を行った。この分析結果から，カツオ稚魚の胃内容物として出現した各餌生物の相対的重要度を明らかにした。また，カツオ稚魚の摂餌行動の日周変化についても知見を得た。

材料および方法

供試魚の採集方法

胃内容物分析のための供試魚は，1994年10月下旬から12月上旬に西部太平洋熱帯海域（0－15°N，130－160°E）においてTANSYU-2型中層トロール網を用いて採集した（図2－1b）。中層トロールの曳網は，グアム島の西側海域で13定点，東側海域で14定点，合計27調査点で行った（図4－1）。曳網は原則として昼夜2回ずつ，合計1日4回，水深40－60m層と80－100m層で1時間の水平曳きを行った。曳網速度は，対水速度4－5ノットに設定した。網口の深度と開き具合は，身網1段目に取り付けた漁網監視装置（Furuno　FNR-200）を使って曳網中常時観察し，目的の網深度を維持するよう操船した。揚網後にはコッドエンド内張り網の後端から全採集生物を計量容器中に取り出し，直ちに湿重量を計測した。次いでソーティン

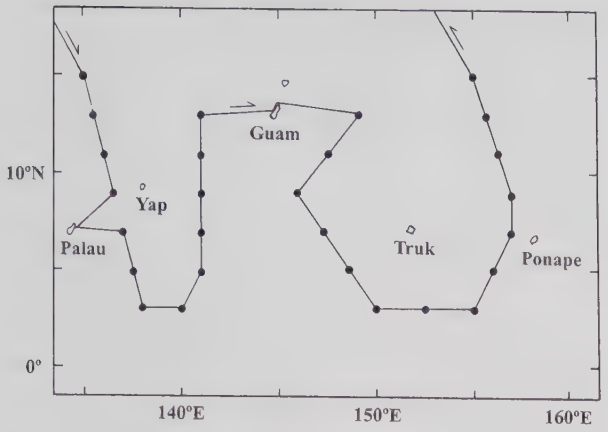


Fig. 4-1. The sampling locations of the TANSYU-2 (●) with cruise tracks of R V *Omi Maru* for the stomach content analysis of juvenile skipjack.

グによってカツオとマグロ属幼稚魚を取り出し，80%アルコールに保存するとともに，これら以外の採集物についてもハダカイワシ類，カタクチイワシ類などの魚類，オキアミ類などの甲殻類，トビイカ類などの頭足類，その他の大まかな動物群に分類し，10%ホルマリン固定または冷凍保存した。

カツオの正確な種査定は，Matsumoto *et al*.(1984)を参照し航海終了後に実体顕微鏡下で外部形態を観察しながら行った。マグロ属幼稚魚については外部形態では属レベルまでしか査定できないため，本研究ではマグロ属 *Thunnus spp*.として扱った。ミトコンドリア DNA による種判別の結果では，これらのマグロ属稚魚は主としてキハダとメバチによって構成されており（供試魚全体の95%），わずかにビンナガが含まれていた（同2.1%）。

本研究の対象海域は，CTD による水温と塩分濃度の観測結果と ADCP による流向・流速の観測結果に基づいて，北赤道海流域（NEC）と北赤道反流域（NECC）の２海域に区分した。

餌生物としての魚類仔魚の採集方法

カツオ・マグロ類仔魚およびその他の魚類仔魚の採集を目的として，口径２m型稚魚ネットを用いて，水深50mまでの傾斜曳きを行った。稚魚ネットの曳網点は，TANSYU-2型中層トロールと同じ調査点とした。曳網は１日１回，夜間に曳網速度２ノットで行った。身網の側長は６m，目合いは前部３分の２が1.7㎜，後部３分の１が0.5㎜であった。採集物は５%ホルマリンで固定し，航海終了後に魚類仔魚を選別した後，実体顕微鏡下でカツオ・マグロ類の種査定，計数とその他魚類の計数を行った。カツオ・マグロ類の種査定は，沖山（1993）に掲載された外部形態の特徴を参考にして行った。

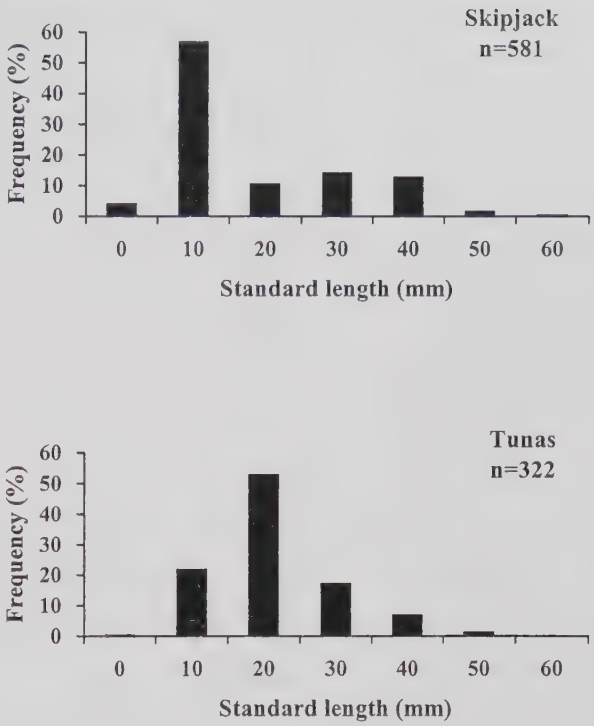


Fig. 4-2. Length-frequency distribution of skipjack (top) and other tuna (bottom) juveniles that were collected by the TANSYU-2 from October to December 1994 and were used for the stomach content analysis.

胃内容物の分析方法

カツオ588個体とマグロ属322個体を供試魚として，胃内容物分析を行った。カツオの体長は8.5－66.8㎜，体重は10－3420mgであった。マグロ属の体長は9.8－55.3㎜，体重は10－2580mgであった（図４－２）。供試魚の採集時刻，採集位置，水深，各調査点での標本数および体長範囲を表４－１a,b にまとめて示した。

カツオ・マグロ属稚魚の胃内容物分析は，次の手順で行った。まずデジタルノギスを使って標準体長（吻の先端から脊椎骨末端までの長さ）を0.1㎜単位で測定した後，電子天秤を使って体重を0.1mg単位で測定した。次いで実体顕微鏡下で消化管を摘出した後，胃を切開し全胃内容物をスライドグラス上に取り出した。胃内容物は，全体の湿重量を測定した後，可能なレベルの動物群まで分類し，動物群ごとに個体数の計数と湿重量の測定を行った。胃内容物の充満度と消化度は，Young and Davis（1990）の基準を参考にして評価した。

すなわち，胃内容物の充満度は５段階（１：空胃，2：ごく少量の胃内容物が存在し，胃の外形は非常に細く，内壁には大きなヒダが存在する状態，３：胃内には少量の内容物が充満，胃の外形はやや丸みを帯び，内壁には小さなヒダが残っている状態，４：胃内にはかな

Table 4-1a. Characteristics of juvenile skipjack tuna used for stomach content analysis collected by the midwater trawl net TANSYU-2 in the tropical western Pacific during October to December 1994.

Station No.	Time	Locations (lat., long.)	Depth (m)	No. of specimens	Size (mm SL)
94101-1	12:45	15°01N, 135°00E	40－60	2	8.7－14.4
94101-2	14:15	14°57N, 135°00E	80－100	1	20.8
94102-2	04:15	12°57N, 135°30E	80－100	5	11.6－25.4
94104-1	13:05	09°01N, 136°30E	40－60	23	24.5－39.6
94104-2	14:35	09°04N, 136°30E	80－100	37	21.2－46.8
94105-2	14:55	06°56N, 137°00E	80－100	3	58.6－66.8
94106-1	13:25	04°59N, 137°30E	40－60	7	16.5－24.4
94106-2	14:55	04°57N, 137°30E	80－100	100	16.1－55.2
94106-3	19:42	04°59N, 137°30E	40－60	5	19.0－30.0
94110-1	13:25	06°59N, 140°59E	40－60	18	13.2－27.9
94110-2	14:48	06°57N, 140°58E	80－100	13	12.2－33.8
94110-3	19:35	07°01N, 141°00E	40－60	10	16.1－24.5
94202-1	12:25	11°00N, 147°30E	40－60	43	9.2－18.6
94207-1	13:25	03°00N, 152°30E	40－60	26	10.5－16.3
94208-1	12:25	03°00N, 155°00E	40－60	77	8.5－17.5
94208-2	18:25	03°00N, 155°01E	40－60	5	10.6－16.1
94208-3	00:35	03°00N, 155°00E	40－60	51	9.1－16.4
94208-4	06:25	03°00N, 155°00E	40－60	105	8.8－25.8
94210-3	19:35	07°00N, 157°00E	40－60	9	32.6－54.7
94210-4	21:00	07°00N, 156°57E	80－100	42	34.7－49.6
94214-2	14:50	14°57N, 154°56E	80－100	3	8.9－12.5
94214-4	21:05	14°57N, 154°55E	80－100	3	12.3－18.7

りの内容物が充満，胃の外形も膨らみヒダがほぼ伸びきっている状態，5：胃が内容物で満たされ，胃壁が非常に薄くなっているため，内容物の一部分が外側から確認できる状態）とし，消化度は3段階（1：高次レベルの査定も不可能な状態，ペースト状，2：脚，鰭が分解，高次レベルの査定可能，3：ほぼ原形を留めた状態，種レベルの査定可能）に区分した。

食性と摂餌行動の分析方法

胃内容物中における各餌生物の相対的な地位を評価するために，動物群ごとの出現個体数，湿重量，出現頻度のデータを使って，Pinkas *et al*.(1971)の方法により相対的重要度指数（IRI）を計算した。この指数は，稚魚の胃の中に見られるさまざまな餌生物を評価・比較するには，簡便で有効な方法である。IRIは次の式により求めた。

$$IRIi = (\%Ni + \%Wi) \times \%Fi$$

ここで，%Niは全餌生物に占める餌生物iの個体数パーセント，%Wiは全餌生物に占める餌生物iの重量パーセント，そして%Fiは供試胃袋100個体当たりの餌生物iの出現率を表わす。この指数を用いることにより，カツオ・マグロ属稚魚の各餌生物の相対的重要度を評価し，北赤道海流域と北赤道反流域間での比較を行った。

カツオ・マグロ属稚魚の摂餌行動の日周性を明らかにするために，胃内容物の充満度と消化度，胃内容物

Table 4-1b. Characteristics of other juvenile tuna used for stomach content analysis collected by the midwater trawl net TANSYU-2 in the tropical western Pacific during October to December 1994.

Station No.	Time	Locations (lat., long.)	Depth (m)	No. of specimens	Size (mm SL)
94104-1	13:05	09°01N, 136°30E	40－60	55	11.5－37.9
94105-1	13:30	06°59N, 137°00E	40－60	1	32.2
94105-2	14:55	06°56N, 137°00E	80－100	1	55.3
94105-4	21:10	06°57N, 137°00E	80－100	1	54.7
94106-1	13:25	04°59N, 137°30E	40－60	15	17.1－43.5
94106-2	14:55	04°57N, 137°30E	80－100	2	22.4－35.2
94106-3	19:42	04°59N, 137°30E	40－60	34	19.5－35.2
94107-3	19:40	02°59N, 138°00E	40－60	1	53.1
94108-2	18:30	02°59N, 140°00E	80－100	2	33.8－36.4
94110-1	13:25	06°59N, 140°59E	40－60	93	12.1－33.6
94110-2	14:48	06°57N, 140°58E	80－100	5	16.5－22.3
94110-3	19:35	07°01N, 141°00E	40－60	1	18.7
94111-1	13:40	09°01N, 141°00E	40－60	1	14.4
94202-1	12:25	11°00N, 147°30E	40－60	3	23.9－24.0
94202-4	06:25	11°00N, 147°29E	40－60	1	21.9
94204-3	19:35	06°59N, 147°20E	40－60	1	13.5
94205-1	13:20	05°00N, 148°41E	40－60	1	21.5
94205-4	21:10	05°00N, 148°37E	80－100	1	22.1
94207-1	13:25	03°00N, 152°30E	40－60	21	11.9－24.4
94207-2	14:45	03°00N, 152°27E	80－100	1	14.0
94207-3	19:40	03°00N, 152°30E	40－60	3	14.7－19.7
94208-1	12:25	03°00N, 155°00E	40－60	1	21.3
94208-2	18:25	03°00N, 155°01E	40－60	4	13.6－26.5
94208-3	00:35	03°00N, 155°00E	40－60	3	16.6－28.0
94208-4	06:25	03°00N, 155°00E	40－60	11	9.8－26.8
94209-1	13:25	05°00N, 156°00E	40－60	1	19.9
94209-3	19:40	05°01N, 156°00E	40－60	6	19.3－26.7
94209-4	21:05	05°05N, 156°00E	80－100	1	22.2
94210-1	13:25	07°00N, 157°00E	40－60	10	17.3－47.5
94210-3	19:35	07°00N, 157°00E	40－60	37	28.4－53.9
94210-4	21:00	07°00N, 156°57E	80－100	1	39.9
94211-3	19:35	09°00N, 157°20E	40－60	3	35.0－45.7
94211-4	21:00	08°57N, 157°17E	80－100	1	32.4

重量指数（SCI）の経時変化を調べた。胃内容物重量指数（SCI）は次の式により求めた。

$$SCI(\%) = SCW/BW \times 100$$

ここで，SCW は全胃内容物の湿重量（mg），BW は魚体の湿重量（mg）を表わす。

また，稚魚の摂餌量を把握する目的で，体長と SCI との関係をプロットし体成長に伴う胃内容物重量の変化を調べた。

結　　果

カツオ稚魚の摂餌生態

1）胃内容物組成

カツオ稚魚の胃内容物として出現した動物群は，魚類仔魚，オキアミ類，カイアシ類，端脚類，頭足類であった。これら以外にヤムシ類，等脚類および魚卵がわずかに認められ，これらはその他の動物群としてまとめて扱った。消化によりどの動物群にも分類できない胃内容物は，種類不明消化物としてまとめて扱った。

胃内容物の中で最も優占的に出現した動物群は魚類仔魚であり，全供試魚の78.4%が捕食していた。魚類仔魚の胃内容物全動物群に占める個体数パーセント（%N）は73.8%を示し，重量パーセント（%W）は82.8%と出現率（%F），%N よりもさらに高い値を示した。したがって，空胃個体を除いたカツオ稚魚全個体を使って計算した魚類仔魚の IRI は12273となった（図４－３）。カツオ稚魚１個体当たりの捕食量は，個体数で１－11個体（平均2.4個体），湿重量では0.2－83.8mg（平均12.8mg）であった。カツオ稚魚の胃内容物中にみられた魚類仔魚は，ほとんどの場合部分的あるいは全体的に消化作用を受けていたため（消化度２または１），科レベルまでの同定ができなかった。しかしながら，しばしばカタクチイワシ科の仔魚が認められ，クロタチカマス科の仔魚も少数確認できた。また，カツオ・マグロ属仔魚も胃内容物として出現しており，同じ分布域内で稚魚が仔魚を共食いしていることが確認された。カツオ稚魚の胃内容物中におけるカツオ・マグロ属仔魚の出現率は3.8%で，カタクチイワシ科は18.4%，クロタチカマス科は2.2%であった。魚類仔魚は全体の78.6%が単独で出現したが，７%はオキアミ類と，1.1%はカイアシ類と，2.2%は端脚類と，3.2%は頭足類と，2.7%はその他動物群とともに捕食されていた。また，魚類仔魚とオキアミ類に加え，端脚類またはその他動物群の３種類の動物群を捕食していたカツオ稚魚は，魚類仔魚捕食者全体の2.2%であった。

魚類仔魚以外の動物群の%F，%N および%W は，

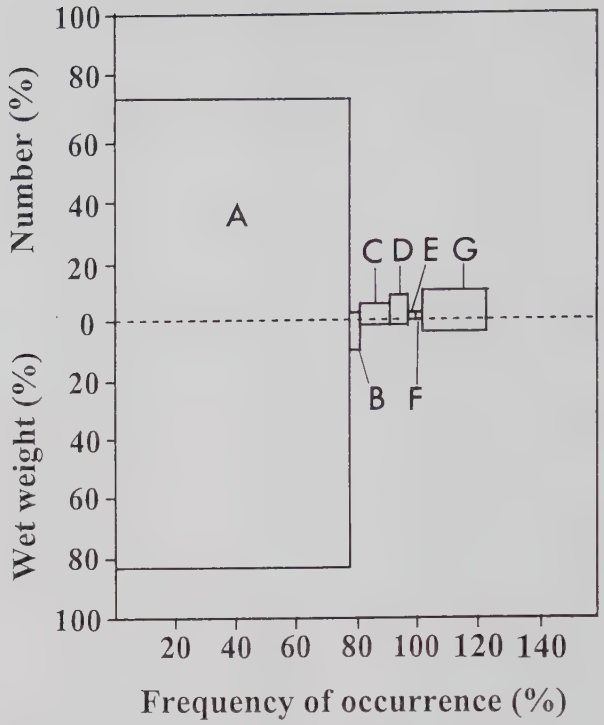


Fig. 4-3. The index of relative importance for each food item (IRI) that was calculated by percentage composition of major food items by number, wet weight, and frequency of occurrence in the stomach contents of juvenile skipjack. The area of each rectangle shows an IRI. A, fish larvae ; B, Cephalopoda ; C, Euphausiacea ; D, Copepoda ; E, Amphipoda ; F, other prey taxa ; G, unidentified prey.

いずれも22%以下と魚類仔魚に比べて低かった。オキアミ類を捕食していたのは供試魚全体の10.2%で，捕食量は１－５個体（平均1.2個体），0.04－9.1mg（平均1.9mg）であった。オキアミ類の%N は4.8%，%W では1.6%であった。カイアシ類の%F は5.9%，%N は7.8%，%W では1.3%であった。端脚類では，%F が2.5%，%N が1.3%，%W が0.3%であった。頭足類では，%F が2.5%，%N が1.7%，%W が9.6%であった。その他動物群では，%F が2.3%，%N が1.3%，%W が0.4%であった。種類不明消化物は%F で21.6%と魚類仔魚に次いで高い値を示したものの，%N は9.7%，%W は４%と低かった。これらの結果から，カツオ稚魚の胃内容物を順位付けると，%F では魚類仔魚，種類不明消化物，オキアミ類，カイアシ類，端脚類と頭足類，その他動物群の順になった。%N では，魚類仔魚，種類不明消化物，カイアシ類，オキアミ類，端脚類とその他動物群，頭足類の順であった。%W では，魚類仔魚，頭足類，種類不明消化物，オキアミ類，カイアシ類，その他動物群，端脚類の順であった。さらに，IRI によってカツオ稚魚の胃内容物を評価すると，第１位の魚類仔魚が12273と圧

Table 4-2. Main prey taxa of juvenile skipjack tuna in the north equatorial current (NEC) and the north equatorial counter current (NECC) areas.

	NEC area				NECC area			
	%F	%N	%W	IRI	%F	%N	%W	IRI
Fish larvae	78.9	84.1	94.7	14107.3	77.4	62.8	77.4	10851.5
Euphausiacea	16.7	6.5	3.2	162.0	6.2	3.1	0.9	24.8
Copepoda	1.1	0.3	0.0	0.3	8.9	15.9	1.9	158.4
Amphipoda	4.4	1.3	0.8	9.2	1.4	1.4	0.1	2.1
Cephalopoda	0.0	0.0	0.0	0.0	4.1	2.4	13.9	66.8
Others	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	2.8	0.6	11.6
Unidentified	23.3	7.8	1.4	214.4	20.5	11.7	5.2	346.5

%F : frequency of occurrence of each food item in the total number of stomachs examined ; %N : percentage of number of each food item to the total number of all food items identified ; %W : percentage of wet weight of each food item to the total wet weight of all food items identified ; IRI : index of relative importance of each prey item ; (%N+%W) × %F.

倒的に多く，次は種類不明消化物（295.7），オキアミ類（65.5），カイアシ類（54.2），頭足類（27.4），端脚類（4.1），その他動物群（3.7）の順であった。

2）胃内容物の海域間比較

各調査点での胃内容物組成データをもとに，北赤道海流域と北赤道反流域におけるカツオ稚魚の食性を，%F，%N，%W，IRI により比較した（表4－2）。魚類仔魚は，北赤道海流域，北赤道反流域とも，%W で94.7%，77.4%と全動物群の中で最も高い割合を占めた。%F および%N でも，魚類仔魚は北赤道海流域で78.9%および84.1%，北赤道反流域で77.4%および62.8%と，全動物群の中で最も高い出現率を示した。したがって，北赤道海流域と北赤道反流域におけるカツオ稚魚の最も重要な餌は魚類仔魚であることが明らかになった。北赤道反流域では，頭足類が%W で13.9%を占めたが，北赤道海流域では出現しなかった。

その他の動物群も，北赤道反流域では%W で0.6%含まれていたが，北赤道海流域では出現しなかった。オキアミ類は，北赤道海流域では IRI で162.0と魚類仔魚，種類不明消化物に次いで3番目に高い値を示したが，北赤道反流域では24.8と低く，5番目にランクされた。一方，カイアシ類は，北赤道反流域では IRI で158.4と魚類仔魚，種類不明消化物に次いで3番目に高い値を示したが，北赤道海流域では0.3と低かった。端脚類の IRI は，北赤道海流域で9.2，北赤道反流域で2.1であった。種類不明消化物の IRI は，北赤道海流域で214.4，北赤道反流域で346.5であった。

これらの結果から，北赤道反流域では餌が多様な分だけ，魚類仔魚の餌生物としての重要性が北赤道海流域よりも低くなっているが（IRI で北赤道海流域の14107.3に対し，北赤道反流域では10851.5），カツオ稚魚にとっては，どちらの海域においても魚類仔魚が餌生物として圧倒的に重要であることには変わりないことが明らかになった。

3）摂餌活動の日周性

カツオ稚魚の胃内容物充満度の経時変化を図4－4に示した。空胃個体（f1）の割合は，22－2時には100%，2－6時には80%を占めたが，日の出後，6－10時には28.5%まで急速に減少した。10－14時には26%になった後，日没に向かう14－18時にはさらに減少を続けて最小値5.3%を示した。18－22時にも，7.4%と低い値であった。これとは対照的に，胃内容物充満個体（f5）の割合は，14－18時に最大値60.6%を示した。

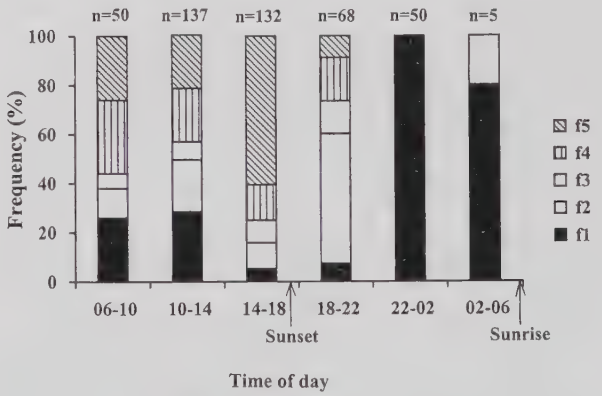


Fig. 4-4. Diel changes in the stomach fullness of juvenile skipjack collected in the tropical western Pacific from October to December 1994. Fullness of stomach contents is defined as f1, empty ; f2, a stomach contains few content, an external shape is slender, and plica mucosas remain large ; f3, a stomach contains a little contents, a round-like shape, and plica mucosas become small ; f4, a stomach contains many contents, a round shape, and plica mucosas are almost disappeared ; f5, a stomach contains full contents, plica mucosas are completely disappeared, and a thin stomach wall.

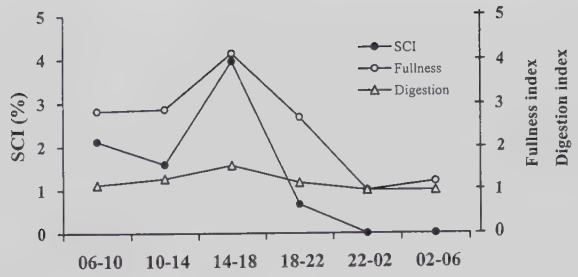


Fig. 4-5. Diel changes in mean values of the stomach content index (SCI), stomach fullness, and digestion index for juvenile skipjack. SCI (%) = SCW/BW×100; SCW, stomach content weight (mg); BW, wet body weight (mg). Fullness of stomach contents is defined as f1, empty; f2, a stomach contains few content, an external shape is slender, and plica mucosas remain large; f3, a stomach contains a little contents, a round-like shape, and plica mucosas become small; f4, a stomach contains many contents, a round shape, and plica mucosas are almost disappeared; f5, a stomach contains full contents, plica mucasas are completely disappeared, and a thin stomach wall. Digestion index is defined as 1, shape of prey deformed, unidentifiable to higher taxa; 2, shape of prey preserved, but a part of appendages or capapace are separated, identifiable to higher taxa; 3, fresh prey, not digested.

日の出後の6－10時には26%, 10－14時には21.7%であった。日没後の18－22時には，f5は急速に減少して8.8%となり，これに変わって空胃に近いf2の割合がこの時刻では最大値の52.9%を占め，f1と合わせると全体の60%が空胃またはほぼ空胃の状態にあった。

次に，胃内容物充満度，胃内容物重量指数(SCI)，胃内容物消化度の平均値をそれぞれ求め，これら指数の経時変化を図4－5に示した。充満度指数は，深夜22－2時に1.0の最低値を示し，夜明けに向かう2－6時にはわずかに上昇して1.2となった。日の出を迎えた後の6－10時, 10－14時には急速に増大して2.8程度となり，日没に近づいていく14－18時に最大値4.1を示した。その後は22－2時に向かって急速に低下した。SCIでは, 22－2時および2－6時に最小値0を示した後, 6－10時および10－14時にはそれぞれ2.1および1.6となり, 14－18時には最大値4.0を示した。一方，消化度指数では，充満度指数やSCIと比較して数値の変動幅が小さかったが, 22－2時および2－6時に最小値, 14－18時に最大値を持つ日周変化が認められた。

以上の結果から，カツオの稚魚期における摂餌活動は，早朝から夕方にかけての明るい時間帯に行われており，基本的には夜間は摂餌しないものと推定した。したがって，カツオ稚魚は典型的な視覚捕食者である

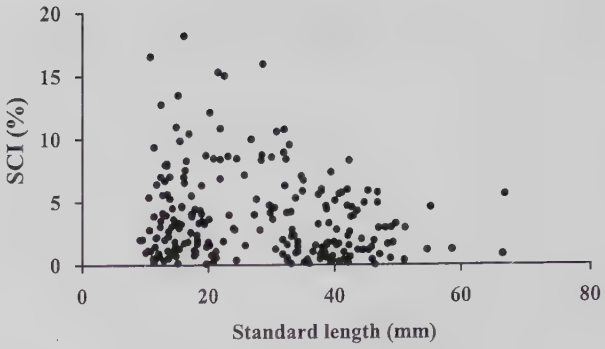


Fig. 4-6. Weight percentage of stomach contents to body weight for skipjack juvenile. SCI (%) = SCW/BW×100; SCW, wet weight of stomach content (mg); BW, wet body weight (mg).

と言える。

4）成長に伴う摂餌量の変化

稚魚期におけるカツオの摂餌量を明らかにするために，体長とSCIとの関係を図4－6に示した。SCIの体長別最大値，つまりこれをその体長時での最大摂餌量と見なすと, 10－30mmSLで10－18%に達してピークを示した。30mm以上に成長するとSCIは漸減し, 50－70mmSLで5%前後に落ち着く。

マグロ属稚魚の摂餌生態

1）胃内容物組成

マグロ属稚魚の胃内容物として出現した動物群は，魚類仔魚を主体としてオキアミ類と頭足類のみが出現し，カツオ稚魚で見られたカイアシ類，端脚類，ヤムシ類，等脚類，魚卵は出現しなかった。マグロ属稚魚でも，消化によってどの動物群にも分類できない胃内容物が出現したため，これらを一括して種類不明消化物として取り扱った。

魚類仔魚は，マグロ属稚魚の80%（%F）が捕食しており，%Nでは全胃内容物中91.2%，%Wでは最も高い96.2%を占めた。したがって，魚類仔魚のIRIは15041となり，マグロ属稚魚にとっては全胃内容物の中で圧倒的に重要であることが明らかになった（図4－7）。マグロ属稚魚1個体当たりの魚類仔魚の捕食量は, 1－14個体（平均2.6個体），湿重量0.1－60.7mg（平均8.8mg）であった。マグロ属稚魚の胃内容物中にみられた魚類仔魚は，ほとんどの場合部分的あるいは全体的に消化作用を受けていたため（消化度2または1），科レベルまでの同定ができなかった。未消化の魚類仔魚の中には，カタクチイワシ科の仔魚のほか，カツオ・マグロ属仔魚，クロタチカマス科の仔魚が出現し，マグロ属稚魚でも仔魚に対する共食いが起こっていた。カツオ・マグロ属仔魚の出現率は6.2%で，

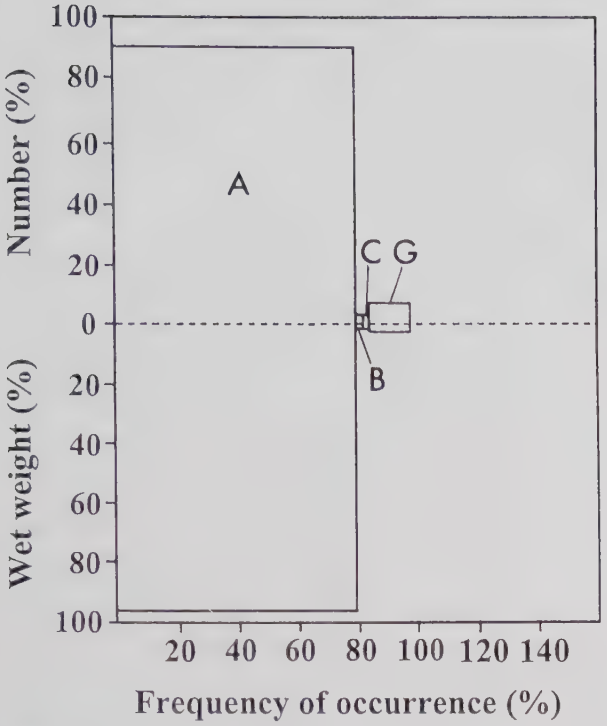


Fig. 4-7. The index of relative importance for each food item (IRI) that was calculated by percentage composition of major food items by number, wet weight, and frequency of occurrence in the stomach contents of other juvenile tuna. The area of each rectangle shows an IRI. A, fish larvae ; B, Cephalopoda ; C, Euphausiacea ; D, Copepoda ; E, Amphipoda ; F, other prey taxa ; G, unidentified prey.

カタクチイワシ科仔魚は7％，クロタチカマス科仔魚は1.6%であった。

オキアミ類と頭足類の%F，%N，%W は魚類仔魚に比べて低く，いずれも2％以下を示した。IRI では，オキアミ類は2.0，頭足類は2.5であった。オキアミ類の捕食量は全て1個体で，湿重量では1.3－2.5mg（平均2.0mg）であった。頭足類の捕食量は，1－2個体（平均1.5個体），湿重量4.4－5.2mg（平均4.8mg）であった。種類不明消化物の%F は14.9%で，%N と%W はそれぞれ6.8%，2.5%，IRI は138.9であった。

以上の結果により，マグロ属稚魚の食性は比較的単純で，魚類仔魚に偏って摂餌していることが明らかになった。

2）胃内容物の海域間比較

北赤道海流域と北赤道反流域におけるマグロ属稚魚の食性を，%F，%N，%W，IRI により比較し，表4－3に示した。北赤道海流域で採集したマグロ属稚魚の胃内容物組成は魚類仔魚，オキアミ類，頭足類，種類不明消化物であったが，北赤道反流域では魚類仔魚と頭足類，種類不明消化物であった。魚類仔魚の%W は，北赤道海流域では92.6%，北赤道反流域では97.7%に達した。魚類仔魚は，北赤道海流域では%N で90.5%，%F で75%を示し，北赤道反流域では%N で92.8%，%F で84.7%を示した。したがって，魚類仔魚の出現率は，%W で評価した場合には海域によらず90%以上と圧倒的に重要な餌となっていることが明らかになった。これら結果から IRI を計算すると，北赤道海流域では13733，北赤道反流域では16135となった。

オキアミ類は，北赤道海流域では出現率が1.5－3.9%で IRI が12.5となったが，北赤道反流域では出現しなかった。頭足類は，北赤道海流域では出現率が0.5－1.3%で IRI が2.3となり，北赤道反流域では出現率が0.6－1.2%で IRI が2.2であった。種類不明消化物は，北赤道海流域では4.4－18.4%出現し，IRI は219となった。北赤道反流域での出現率は1.7－11.8%と低かったため，IRI では90.9と北赤道海流域の半分以下となった。

Table 4-3. Main prey taxa of other juvenile tuna in the north equatorial current (NEC) and the north equatorial counter current (NECC) areas.

	NEC area				NECC area			
	%F	%N	%W	IRI	%F	%N	%W	IRI
Fish larvae	75.0	90.5	92.6	13732.5	84.7	92.8	97.7	16135.4
Euphausiacea	3.9	1.5	1.7	12.5	0.0	0.0	0.0	0.0
Copepoda	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Amphipoda	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cephalopoda	1.3	0.5	1.3	2.3	1.2	1.2	0.6	2.2
Others	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Unidentified	18.4	7.5	4.4	219.0	11.8	6.0	1.7	90.9

%F : frequency of occurrence of each food item in the total number of stomachs examined ; %N : percentage of number of each food item to the total number of all food items identified ; %W : percentage of wet weight of each food item to the total wet weight of all food items identified ; IRI : index of relative importance of each prey item ; (%N+%W) × %F.

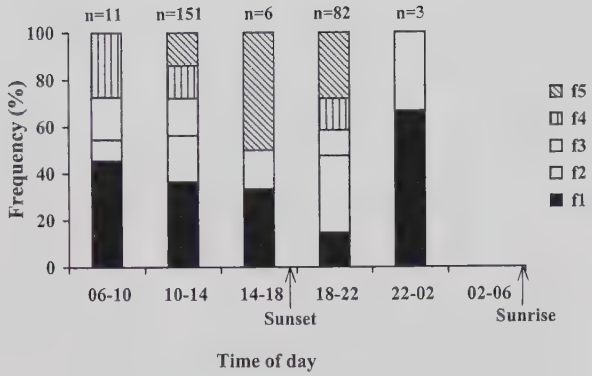


Fig. 4-8. Diel changes in the stomach fullness of other juvenile tuna collected in the tropical western Pacific from October to December 1994. Fullness of stomach contents is defined as f1, empty ; f2, a stomach contains few content, an external shape is slender, and plica mucosas remain large ; f3, a stomach contains a little contents, a round-like shape, and plica mucosas become small ; f4, a stomach contains many contents, a round shape, and plica mucosas are almost disappeared ; f5, a stomach contains full contents, pliuca mucosas are completely disappeared, and a thin stomach wall.

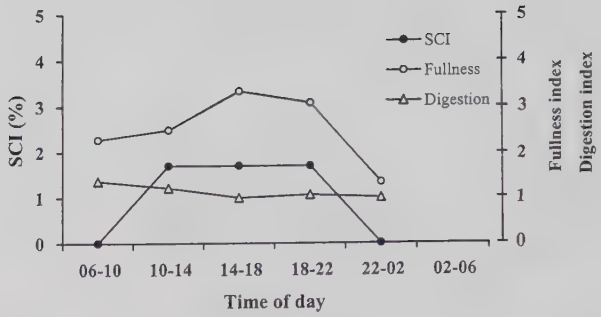


Fig. 4-9. Diel changes in mean values of the stomach content index (SCI), stomach fullness, and digestion index for other juvenile tuna. SCI (%) = SCW / BW × 100 ; SCW, stomach content weight (mg) ; BW, wet body weight (mg). Fullness of stomach contents is defined as f1, empty ; f2, a stomach contains few content, an external shape is slender, and plica mucosas remain large ; f3, a stomach contains a little contents, a round-like shape, and plica mucosas become small ; f4, a stomach contains many contents, a round shape, and plica mucosas are almost disappeared ; f5, a stomach contains full contents, plica mucosas are completely disappeared, and a thin stomach wall. Digestion index is defined as 1, shape of prey deformed, unidentifiable to higher taxa ; 2, shape of prey preserved, but a part of appendages or capapace are separated, identifiable to higher taxa ; 3, fresh prey, not digested.

これらの結果から，マグロ属稚魚は北赤道海流域と北赤道反流域のいずれの海域でももっぱら魚類仔魚を捕食し，その他の餌生物はあまり利用していなかった点から，カツオよりもさらに魚食性が強いことが明らかである。

3）摂餌活動の日周性

マグロ属稚魚の胃内容物充満度の経時変化を図4－8に示した。空胃個体(f1)は，22－2時に最も多く，全体の66.7%を占めた。この時間には，残り33.3%の個体もほぼ空胃状態（f2）にあった。空胃の割合は，日の出後の6－10時に45.5%，10－14時に36.4%，14－18時に33.3%へと減少し続け，18－22時には14.6%で最小値となった。一方，充満胃個体(f5)の割合は，22－2時および6－10時には0%，10－14時に13.9%となり，14－18時に最大値50%に達した。その後，18－22時には28.1%に減少した。

胃内容物充満度の平均値（充満度指数），胃内容物重量指数（SCI），胃内容物消化度の平均値（消化度指数）について，経時変化を図4－9に示した。充満度指数では，22－2時に最低値1.3を示したが，夜明け後の6－10時に2.3，10－14時に2.5へと増加を続け，14－18時には最大値3.3を示した。日没後の18－22時には，3.1に減少し，さらに22－2時にかけても減少を続けた。SCIでは，10－14時，14－18時，18－22時に1.7%を示し，これらの時間帯の前後，6－10時と22－2時には0%であった。消化度指数では，6－10時に1.4を示し，10－14時に1.2，14－18時に1へとゆるやかな減少を続け，その後18－22時および22－2時には変化しなかった。

以上の結果から，マグロ属稚魚の摂餌活動は，早朝から夕方にかけての昼間に行われ，基本的には夜間は摂餌しないものと推定された。したがって，マグロ属稚魚もカツオと同様に典型的な視覚捕食者と見られる。

4）成長に伴う摂餌量の変化

マグロ属稚魚の体長とSCIとの関係を図4－10に示した。体長10mmから20mmの間では，SCIの最大値が5%から13%まで増大し，ピークとなった。その後，体長30mm前後では7%に低下し，さらに体長55mmでは2%程度にまで低下した。

カツオの餌としての魚類仔魚の分布

カツオとマグロ属稚魚にとってIRIから評価した主要な餌である魚類仔魚の各調査点での採集量を，北赤道海流域と北赤道反流域に分けて表4－4に示した。北赤道海流域では合計11点で調査した。各仔魚の採集量は，カツオが3調査点で1－3個体，キハダが1調査点で2個体，マグロ属の1種が1調査点で3個体採集され，その他の魚類は10調査点で3－78個体が

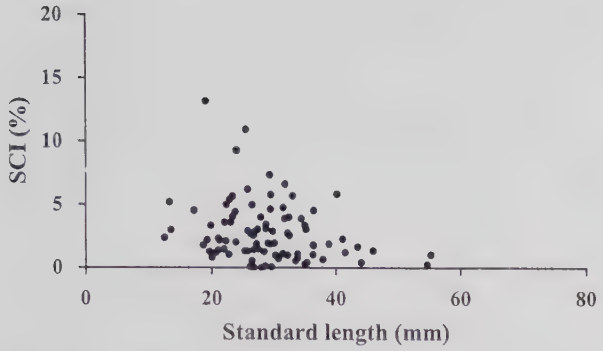


Fig. 4-10. Weight percentage of stomach contents to body weight for other juvenile tuna. SCI (%) = SCW BW × 100 ; SCW, wet weight of stomach content (mg) ; BW, wet body weight (mg).

採集された。それぞれの平均採集個体数（総採集個体数／総調査点数）は，カツオ0.6，キハダ0.2，マグロ属の1種0.3，その他魚類23.1であった。これに対し，北赤道反流域では合計13点で調査した。各仔魚の採集量は，カツオが6調査点で1－11個体，キハダが1調査点で2個体，マグロ属の1種が2調査点で1個体ずつ採集され，その他の魚類は全調査点で3－98個体が採集された。それぞれの平均採集個体数は，カツオ1.7，キハダ0.2，マグロ属の1種0.2，その他魚類51.8であった。

考　　察

胃内容物として出現した各餌生物を相対的重要度指数（IRI，Pinkas *et al*. 1971）により評価した結果，西部太平洋熱帯海域におけるカツオ稚魚の餌生物として最も卓越していたのは，魚類仔魚であることが明らかとなった。オキアミ類，カイアシ類，端脚類および頭足類もカツオ稚魚の胃内容物として出現したが，これらの相対的重要度は，北赤道海流域と北赤道反流域間で異なっていた。青木（1999）によれば，マリアナ諸島沖海域からカロリン諸島周辺で採集されたカツオ稚魚の胃内容物中に出現した主な餌生物は，魚類仔魚，カイアシ類，オキアミ類，頭足類であり，これら餌生物を重要度指数により評価し，最も優占的な餌生物は魚類仔魚であると結論づけた。彼はまた，カロリン諸島沖とマリアナ諸島沖で採集されたカツオ稚魚の胃内容物組成を比較し，カロリン諸島沖ではカイアシ類，オキアミ類，頭足類など多様な胃内容物組成を示したが，マリアナ諸島沖ではこれらが出現しなかったことを報告した。マリアナ諸島沖は北赤道海流域に相当し，カロリン諸島沖は北赤道反流域に相当するが，北赤道反流域の胃内容物組成が北赤道海流域に比べて多様である点は，本研究結果と一致している。したがって，カツオ稚魚は魚食性を基本としながらも，生息域の生物環境に応じてさまざまな種類の餌生物を利用しながら生活しているものと考えられた。

カツオとマグロ属稚魚の胃内容物組成の違いから，稚魚期における魚類仔魚に対する依存度は，マグロ属稚魚の方がカツオよりも高いことが示された。カツオ成魚にとっての主要な餌生物は，魚類，甲殻類および頭足類であるが（Alverson 1963，Dragovich 1970，Dragovich and Potthoff 1972，堀田・小川 1955，Nakamura 1965，Roger 1994），キハダやメバチなどマグロ属の成魚では，魚類に対する依存度がカツオよりも高いとされている（落合・田中 1998）。これらの結果は，カツオと他のマグロ類における摂餌選択性の違いが稚魚期と成魚期で共通していることを示すとともに，種としての食性の違いを表している。

カツオ稚魚の摂餌活動は，朝から夕方にかけての日中に行われていた。本種の仔魚と成魚も日中に摂餌することが知られており，これらを総合すると本種の摂餌活動が全ての生活史段階に共通して日中に行われると考えられた。すなわち，本種は一生を通じて視覚捕食者であると見なすことができる。一方，マグロ属稚魚は昼間摂餌活動をしていたものの，メバチの成魚では日中だけでなく夜間にも摂餌することが知られており（渡辺 1958），本種の摂餌時刻は生活史段階に応じて変化する可能性がある。キハダを初めとした他のマグロ属では夜間に摂餌するという報告はないため，現段階では夜間の摂餌活動はメバチに特有の行動と考えられる。

本章で得られた稚魚期の食性と既存の仔魚期の知見を総合すると，主要な餌生物の種類は，カツオの初期生活史の中で成長段階によって変化するものと考えられる。仔魚期の主要な餌生物は，尾虫類を中心とした小型の動物プランクトンである（魚谷ら1981，Young and Davis 1990）。カツオ仔魚は成長による消化器官の発達にともなって，魚食性への依存度を増していくことが知られている（西川 1975，Tanaka *et al*. 1996）。耳石（扁平石）の日輪観察によるカツオ仔稚魚の成長解析結果によれば，本種は稚魚期に入ると成長速度が著しく速くなる（第5章参照）。このような急激な成長は，稚魚期における魚食性の発現によりもたらされるとの解釈が可能ではないだろうか。カツオ稚魚の胃内容物中に見られたカイアシ類は，他の動物群に比べて個体のサイズが小さいため，これによって胃内を満たすには他の動物群よりも多くの個体数を捕食する必要がある。これに対して，魚類仔魚は個体サイズが大きく，他の動物群よりも少数で胃内を満たすことができ，摂餌回数が少なくて済む点で効率的である。カツオ稚魚の主要な生息場である熱帯域は，一般に温帯域

Table 4-4. Collections of fish larvae as preys of skipjack and other tuna juveniles using by larval net in the tropical western Pacific during October to December 1994.

North equatorial current area

Station No.	Time	Locations (lat., long)	No.of larvae			
			Skipjack	Yellowfin	*Thunnus sp.*	Others
94103	19:21	11°00N, 136°00E	0	0	0	0
94110	19:17	7°00N, 141°00E	2	0	3	78
94111	19:20	9°01N, 141°02E	2	0	0	42
94112	0:24	11°00N, 141°01E	0	0	0	3
94113	19:21	13°20N, 141°01E	0	0	0	27
94201	19:22	13°00N, 149°01E	3	0	0	19
94202	0:19	11°00N, 147°30E	0	0	0	52
94211	19:20	9°00N, 157°20E	0	0	0	6
94212	19:21	11°00N, 156°30E	0	0	0	2
94213	19:21	13°00N, 155°50E	0	0	0	4
94214	19:24	15°00N, 155°00E	0	2	0	21
Total			7	2	3	254
Mean			0.6	0.2	0.3	23.1

North equatorial counter current area

Station	Time	Locations (lat., long.)	No.of larvae			
			Skipjack	Yellowfin	*Thunnus sp.*	Others
94105	19:19	7°00N, 137°00E	1	2	0	20
94106	19:20	5°00N, 137°30E	0	0	0	33
94107	19:21	3°00N, 138°00E	0	0	0	61
94108	0:21	3°00N, 140°00E	0	0	1	74
94109	19:20	5°00N, 141°00E	0	0	0	3
94203	19:18	9°00N, 146°00E	11	0	0	43
94204	19:18	7°00N, 147°20E	4	0	0	81
94205	19:19	5°00N, 148°40E	0	0	0	38
94206	19:19	3°00N, 150°00E	2	0	0	98
94207	19:23	3°00N, 152°30E	2	0	0	91
94208	0:19	3°00N, 155°00E	0	0	0	36
94209	19:24	5°00N, 156°00E	2	0	0	85
94210	19:18	7°00N, 157°00E	0	0	1	10
Total			22	2	2	673
Mean			1.7	0.2	0.2	51.8

に比較して貧栄養であることから，餌生物量は温帯域より熱帯域の方が相対的に少ないと考えられる。このような環境下でより速く成長することは，生態系内で弱い立場にある仔稚魚期をできる限り速く通過し，生残率を高くする上でも重要な戦略であると考えられる。

第3章で詳しく記述したように，西部太平洋熱帯域では，カツオ稚魚はNEC海域からNECC海域にかけて広範に分布していたのに対し，マグロ属稚魚は南側のNECC海域を中心に分布していた（田邉ら 1998）。鉛直分布では，カツオ稚魚が水深40－120m層を中心に出現したのに対し，マグロ属稚魚の分布の中心は0－80m層であり，カツオよりも浅かった。ここで重要な点は，このようなカツオとマグロ属稚魚の分布生態の相違と本研究結果から得られたカツオ・マグロ属稚魚の食性の相違との関係である。1つの仮説として，カツオ稚魚はマグロ属稚魚よりも水平的，鉛直的により広い範囲に分布することにより，より多様な餌生物を利用することが可能になったことが考えられる。より多くの種類の餌生物を利用できることの利点として，初期生活史の中での生残率を高くすることが期待できる。両者の分布と食性における相違は，仔魚期においても見られることから（Boehlert and Mundy 1994, Davis *et al*. 1990, 魚谷ら 1981, Young and Davis 1990），熱帯の外洋表層域においてカツオとマグロ属の仔稚魚が生態上の棲み分けを行っているものと考えられる。

カツオ・マグロ類では，しばしば仔稚魚に対する共食い現象が起こることが知られている（青木 1999, Dragovich 1970, Dragovich and Potthoff 1972, 堀田 1953, 飯塚ら 1989, King and Ikehara 1956, 森 1972, Nakamura 1965, 須田 1953, Yoshida 1971）。本研究においても，カツオ・マグロ属稚魚とも胃内容物中にこれらの仔魚が認められた。本研究の対象とした西部太平洋熱帯海域では，カツオ・マグロ属仔魚の胃内容物からの出現率は，3.8－6.2%であった。中部熱帯太平洋では，24－44%と高い出現率が報告されており（Nakamura 1965），これは他の報告における出現率よりもかなり高い。これらの知見から，カツオ・マグロ類では，主要な再生産の場である熱帯外洋域において，成魚が幼魚を，幼魚が稚魚を，稚魚が仔魚を捕食する共食い現象が，至る所で日常的に起こっていると推定できる。このような共食いによる食物連鎖は，カツオ・マグロ類にとってどのような生態的意味をもつのであろうか。飯塚ら（1989）はカツオの共食い現象について，大型個体の成長と発育を支えることにより，カツオ資源全体の安定に貢献するという考えを示した。環境条件の季節変化が比較的少ない熱帯域では，周年にわたりカツオ仔稚魚が出現することから，熱帯の外洋表層域では，さまざまな大きさ（生活史段階）のカツオが同じ分布域に同時に生息することが推測できる。減耗率の高い初期生活史段階では，比較的餌生物の少ない熱帯外洋域において，カツオの最も重要な餌である魚類を自ら供給することにより，個体の生き残りと成長を助け，資源への加入量を安定化させる意義があるのではないだろうか。本種がここでの初期生活史をどのように過ごすかにより，その後の資源への加入量が左右されると考えられる。したがって，これらの基本的な生物過程を把握することが，資源の加入機構を明らかにする上で重要である。

第5章　初期成長

魚類の生活史において，卵からふ化後の仔魚期，さらに稚魚期へと移行していくいわゆる初期生活史段階は，一般に最も激しく減耗し，急激に個体数が減少する時期にあたる。一方，その中で生き残った個体の内部においては，生活していくための様々な器官形成や機能発達が進行しながら，外部では個々を取り巻く生態系内での激しい生存競争が繰り広げられる。外洋表層域の生態系内において，高次捕食者の1種に数えられるカツオといえども，初期生活史段階では魚食性魚類をはじめとした多くの捕食者に捕食され高い減耗率を示す。したがって，この仔稚魚期をいかなる成長様式で乗り切るかによって，種としての生き残り戦略が特徴づけられると考えられる。カツオは主として熱帯の外洋表層域を初期生活史の場として利用していることが確認されているが（田邉ら 1998），周年高水温が維持され環境変動も少ない一方で温帯域に比べて貧栄養とされるこの海域で，どのような成長様式と生き残り戦略を展開し，資源への加入量を確保しながら個体群を維持し続けてきたのであろうか。本種の産卵は長期間連続的に行われ，1個体当たりの産卵数は体重4kgの雌で1産卵期に3000万粒と推定されている（Hunter *et al*. 1986）。西部太平洋における成熟魚の出現海域は，熱帯から亜熱帯にかけての外洋域であり，北半球の夏季（4－9月）には35°Nから15°Sの広大な海域に拡がる（永沼 1979）。このような雌1個体の産卵量の多さと産卵場の広さ，さらに産卵期の長さから，資源全体としての産卵量の膨大さを伺い知ることができる。このような本種の産卵特性は，初期生活史において一定の個体数を残すための重要な生残戦略であろうと推察される。一方，本種の後期仔魚における形態的特徴として，体の大きさに比較して巨大な頭部が挙げられ，大きな目と口裂が成長過程において

Table 5-1. Characteristics of skipjack tuna used for otolith increment analysis.

Years	Periods	Vesssls	Locations	Nets	No. of samples	Size (mm SL)
1994	11.01－12.07	Omi	0－15°N, 130－160°E	TANSYU-2	397	8.6－114.1
1995	10.29－12.07	Omi	0－20°N, 130－160°E	TANSYU-2	399	8.6－ 57.7
1996	11.10－12.01	Wakataka	0－20°N, 130－160°E	MOCNESS	3	3.4－ 5.3
1997	4.20－ 6.01	Shin-riasu	0－35°N, 130－150°E	bongo net	12	3.3－ 7.6

比較的早期に発現する魚食性を形態面から支持すると考えられる（落合･田中 1998, Tanaka *et al.* 1996)。

近年魚類の成長研究において，耳石の日輪を用いた日齢解析がさかんに行われるようになり，初期成長様式の解明が進むとともに資源動態研究への応用がなされている（Jenkins and Davis 1990, Meekan and Fortier 1996, Watanabe and Kuroki 1997, Watanabe *et al*. 1997)。とりわけ初期の成長と生残過程を明らかにすることは，資源への加入量変動機構を解明するための鍵になるといった認識も高まりつつある（渡邊 1997)。一方，カツオについては研究史で述べたように初期成長に関する知見がごく限られたものしかなく，初期の成長様式や生残過程はほとんど不明とされてきた。本研究の第3章および第4章では，カツオが初期生活史においてどのような分布の特徴をもち，どのように摂餌活動を行っているかといった熱帯外洋表層域での生活様式を示したが，仔稚魚の成長様式はこれらの生態と密接に関連しているものと考えられる。本章では，耳石日輪を用いて西部太平洋熱帯域におけるカツオの仔魚期から稚魚期にかけての成長過程を明らかにすることにより，その生残戦略について考察した。

材料および方法

カツオ仔稚魚標本の採集と保存

仔魚：耳石日輪観察のためのカツオ仔魚標本は，1996年11－12月に水産庁東北区水産研究所の漁業調査船若鷹丸（692トン）による西部太平洋熱帯域におけるカツオ幼魚の生息環境調査，1997年4－6月に岩手県立宮古水産高等学校の漁業実習船新りあす丸（471トン）による日本周辺及び南方水域におけるカツオ資源構造調査において採集した。カツオ仔魚の採集には，若鷹丸では開口部面積1㎡型のMOCNESS（網目合330㎛）を使用し，新りあす丸では口径70cm型ボンゴネット（網目合335㎛）を使用した。MOCNESSは西部太平洋熱帯海域（0－20°N, 130－160°E）において水深0－200mで6層の層別採集を行い，ボンゴネットは本州南岸沖～グアム・パラオ周辺海域（0－35°N, 130－150°E）において水深20－30m層で20分間の水平曳きを行った。それぞれのネットにより採集した標本は，80%アルコール中に保存して持ち帰り，実験室において種の同定を行ってカツオ仔魚を取り出した。カツオ仔魚は，実体顕微鏡下で外部形態の観察により沖山（1993）に従って査定し，1996年に採集された3個体（体長3.4－5.3mm）と1997年に採集された12個体（体長3.3－7.6mm）を耳石日輪の観察に使用した。

稚魚：耳石日輪観察のためのカツオ稚魚標本は，1994年および1995年10－12月に山口県立水産高等学校の漁業実習船青海丸（403トン）による西部太平洋熱帯水域におけるカツオ稚幼魚の分布調査において，TANSYU-2型中層トロール網により採集した。本研究で使用したカツオ稚魚並びに仔魚標本の採集データの概要を表5－1に示す。これらの標本は，採集後ただちに船上で80%アルコール中に保存し，後述する耳石日輪観察のための処理を行うまで実験室内に常温で保管した。1994年の調査では，0－15°N，130－160°Eの海域内に設定した27定点において昼夜にわたり水深40－60m層または80－100m層での1時間水平曳きを行った。合計98回の中層トロール曳網によって得られた1662個体のカツオのうち，8定点15回の曳網によって採集された397個体（体長8.6－114.1mm）を耳石日輪解析用の標本として使用した。1995年の調査では，0－20°N, 130－160°Eの海域内に設定した20定点において，昼夜にわたり水深0－200mでの1時間水平曳きによる20mごとの層別採集を行った。合計75回の曳網によって得られた2928個体のカツオのうち，5定点9回の曳網によって採集された399個体（体長8.6－57.7mm）を用いて耳石日輪解析を行った。カツオ仔稚魚の標本が採集された位置を図5－1に，体長組成を図5－2にそれぞれ示した。

耳石の摘出と輪紋観察のための前処理

1）仔魚

耳石日輪観察のためのカツオ仔魚は，万能投影機を使って拡大した画面上で標準体長（standard length, SL）を0.1mm単位で測定した。実体顕微鏡下で，柄付き針を用いて左右の扁平石を摘出した。取り出した扁

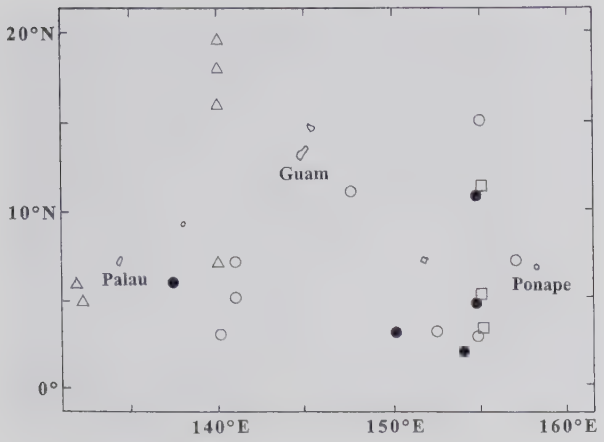


Fig. 5-1. The sampling locations for the otolith daily increment analysis of skipjack tuna collected during the 1994 *Omi Maru* (○), 1995 *Omi Maru* (●), 1996 *Wakataka Maru* (□), and 1997 *Shinriasu Maru* (△) cruises.

平石は，蒸留水中で付着した体組織を取り除いてから乾燥させ，エナメル樹脂でスライドグラス上に固定した。これを光学顕微鏡下で透過光により対物レンズ100倍で観察した。

2）稚魚

肉眼で吻端と下尾骨の後端を確認しながら，ノギスを使って0.1㎜単位で標準体長を測定した後，頭部を鰓蓋後縁付近から切り取った。ついで頭部を体軸を含む突状面を通るよう左右2等分に切開し，実体顕微鏡下で左右の扁平石を取り出した。これらの扁平石は，蒸留水中で付着した魚体組織を取り除いてから乾燥させ，市販のマイクロプレートに収納して常温で保管した。

稚魚の耳石は，市販のラッピングフィルム(1, 3, 9㎛)を用いて扁平面（sagittal plane）の両側を研磨してから輪紋を観察することとした。スライドグラス上でエナメル樹脂とエナメル薄め液との混合液を作って体表側の面が上を向くように扁平石を包埋し，最低2日間以上常温で放置して硬化させた。ついでこのスライドグラスを実体顕微鏡のステージ上に置き，包埋された扁平石の上からラッピングフィルムをあて，凸部が削りとられて扁平面が平らになるまで研磨した。片面の研磨が終わった扁平石は，エナメル薄め液を使ってエナメル樹脂を溶解させ，裏返して体軸側の面が上を向くようにし，外側面と同様に処理して研磨した。光学顕微鏡で核から縁辺までの輪紋が観察できる状態になるまで研磨した後，これに上からエナメル樹脂を被せて研磨面を保護し，輪紋観察を行った。

耳石日輪の計測と解析

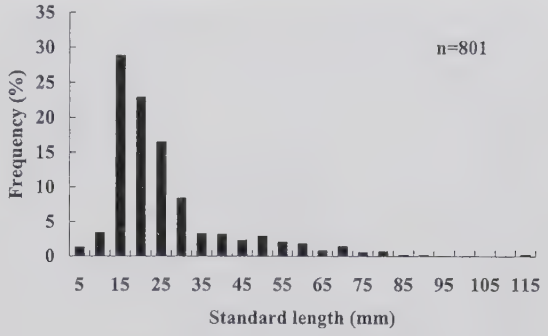


Fig. 5-2. Length-frequency distribution of skipjack tuna for the otolith daily increment analysis. The specimens were collected from October to December 1994 and 1995, from November to December 1996, and from April to June 1997 in the tropical western Pacific (0－20°N, 130－160°E)

1）輪紋の観察および計測

上述の前処理を終えた扁平石は，耳石日輪計測システム（ラトックシステムエンジニアリング　ARP W）を使って輪紋の観察と計測を行った。本システムは，光学顕微鏡（オリンパス　BX60）とCCDカメラ，モニター，パソコン，計測ソフトによって構成されている。計測にあたっては，光学顕微鏡からの観察像がカメラを通してモニター上に写しだされ，計測者は接眼レンズとモニター上の両方で日輪の位置を確認しながら，画面上で耳石の中心（核）に中心点を入力した後，中心から縁辺に向かって計測線を引いた。次いで核から縁辺に向かって1本ずつ日輪を読みとり，各日輪の外縁に計測点を入力した。この作業により各個体の日輪数と各輪紋間隔が磁気ファイルとして保存される。研磨しても輪紋の計測が不可能と判断された個体については，計測作業から除外した。

仔魚の扁平石では，外形がほぼ円形をしているため計測方向は固定せず，最も輪紋の見えやすい部分に計測線を設定し，対物レンズ100倍で計測した。これに対し稚魚の扁平石では，通常核から後方側のpostrostrum方向に向かって最も輪紋のよく見える部分で計測線を設定し，各日輪の位置を確認しながら対物レンズ50倍で計測作業を行い，読みにくい場合には対物レンズを100倍に変更して詳しく観察した。仔稚魚ともに扁平石の核から縁辺までの最長距離を測定し，耳石半径として記録した。

稚魚期における日輪形成の確認：カツオの仔魚期における耳石日輪の形成については，Radtke（1983）の報告があり，本研究ではこれを参照しながら日輪の観察と計測を行った。しかしながら，稚魚期における耳石日輪の形成についてはこれまで確認されていなかったため，本研究で使用した稚魚から得られた輪紋計測データを用いて，輪紋形成周期の確認を行った。供試

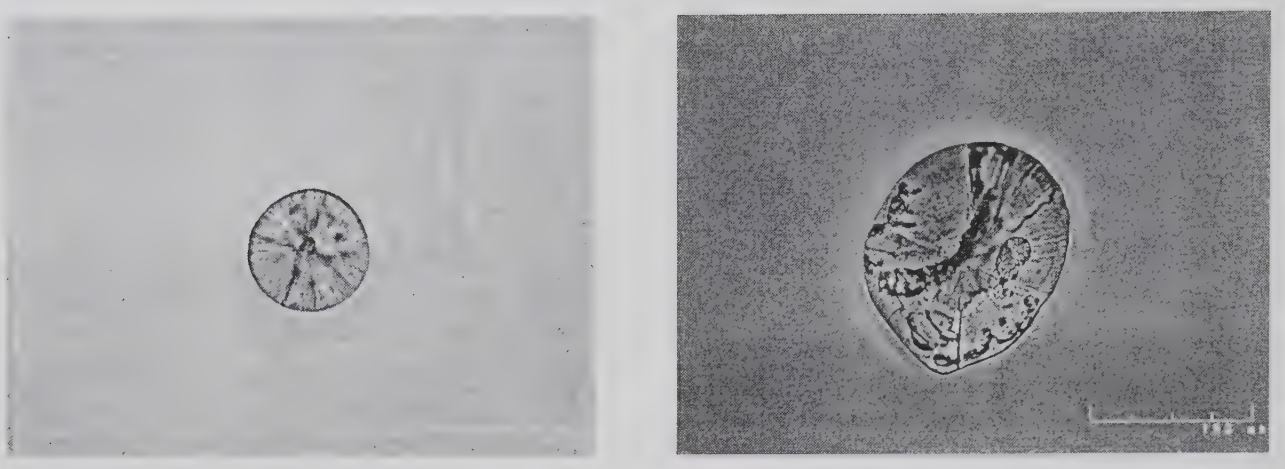


Fig. 5-3a. The light microscopic photographs of the saggital otolith for larval skipjack. The standard length of the specimens is 3.4㎜ (left) and 7.6㎜ (right). The shape of the otolith is a round at first stage but changes to an oval in a short time and the rostrum appeared in the frontal side.

魚としては，上述の1995年青海丸調査航海で採集したカツオ稚魚のうち，4定点7曳網で得られた採集時刻の異なる稚魚122個体（体長12.9－39.8㎜）を使用した。これら稚魚の扁平石は，縁辺部が最後まで明瞭に観察できる個体のみを使用した。各個体の縁辺成長率（C）を求めるために，以下に示す式を用いた（Gartner, Jr. 1991）。

$$C=W_n/[(W_{n-1}+W_{n-2})/2] \times 100$$

ここで，W_n は一番外側にある輪紋，いわゆる最外輪紋の幅（㎛），W_{n-1}および W_{n-2}は最外輪紋の内側1本目および2本目のすでに完成された輪紋の幅（㎛）を示し，C の値が100%に達すると縁辺部の新しい輪紋が完成したことを意味する。各個体について求めたCを縦軸に，その個体が採集された時刻を横軸としてプロットし，縁辺成長率の経時変化を調べることにより輪紋形成に日周性があるかどうか確認した。

2）成長解析

輪紋数および輪紋間隔データの解析に基づいて，西部太平洋熱帯海域でのカツオの仔魚期から稚魚期にかけての成長過程を明らかにした。各個体の日輪数および輪紋間隔データを比較することにより，個体レベルでの成長過程を調べるとともに，同じ調査点で採集された群の中での成長差や生息海域間での成長差，年の違いによる成長差の有無について検討した。

結　　果

耳石および輪紋の形態変化

1）耳石の外部形態

仔魚期における扁平石の外観は，多少の個体差が見られるものの総じて円形またはそれに近い形状をしていた。カツオ仔魚（3.3－7.6㎜ SL）の扁平石では，小型の個体ほど歪みの少ない真円形に近かった。この時期の扁平石は厚みが薄く，色はほぼ無色で光の透過率も高かった（図5－3a）。

仔魚期の終わりから稚魚への移行直前にある個体（8.6－9.4㎜ SL）の扁平石では，体軸に対して前後方向の成長速度が上下方向の成長速度を上回るようになるため，楕円形を呈するようになった。前方の下側では，rostrum と通称される突出部が出現し始めていた。

稚魚期への移行を終えた個体の扁平石（13.7㎜ SL）では，rostrum の伸長とともに rostrum の上側に anti-rostrum と通称される小規模の突出が出現した。体表側の扁平面では，中央部が隆起する丘型あるいは山型となったのに対し，体軸側の扁平面では，中央部が陥没し，体軸の前後方向に sulcus と通称される深い溝状構造が形成された。この溝は，通常扁平石の前方から後方まで縦断していたが，中央部では円形をしている場合も見られた。溝の深さは中央部で深く，前方と後方で浅い場合が一般的であった。扁平石内部には，多くの個体で亀裂構造が複数認められ，これらが輪紋観察の障害となった。これら亀裂構造の形状や数は個体によって異なっており，その成因について外観から推測することは難しいが，おそらくは扁平石の形成過程において個体内部で起こった生理的要因などにより生じたものと推定される。標準体長33.7㎜の扁平石では，全体に厚みを増して外形に凹凸が目立つようになり，この凹凸は成長とともに大きくなった（図5－3b）。Rostrum の長さは全体の3分の1に達して二等辺三角形型を呈するとともに，体表方向に反り返るような形状になった。標準体長50㎜以上になると，扁平

Fig. 5-3b. The light microscopic photographs of the saggital otolith for juvenile skipjack at 33.7㎜ SL. Irregularities on the surface of the otolith increase with growth.

Fig. 5-3c. The light microscopic photographs of the saggital otolith for juvenile skipjack at 51.8㎜ SL. The shape of the otolith become to be complicated and to be extended along rostrum-postrostrum axis.

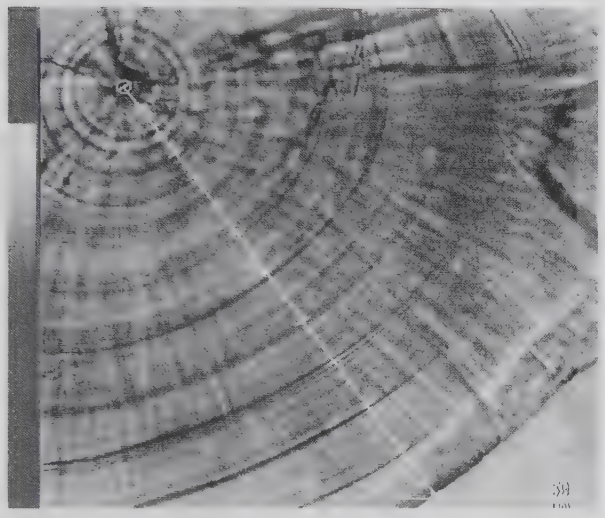


Fig. 5-4. The light microscopic photographs with the otolith measurement system for juvenile skipjack at 29.8㎜ SL. The increment width increases from the core to the margin. Number of the daily increments observed in the specimen is 15.

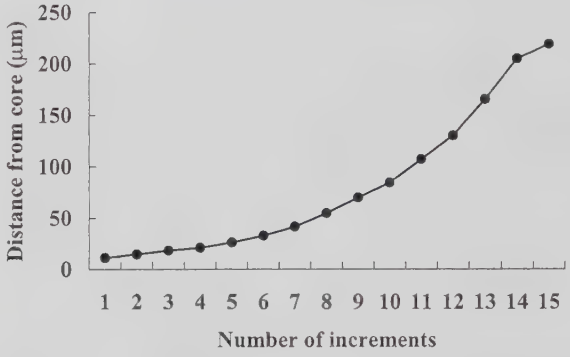


Fig. 5-5. The distance from the core to the margin for the saggital otolith of juvenile skipjack.

石の外形は全体的に丸みがなくなり，前方には rostrum と antirostrum の尖った構造を持つ長方形に近い形状になった（図５－３c）。縁辺部では，外側に向かって沈着した成分が複雑に連なって張り出す構造が目立つようになった。

２）輪紋の形状

カツオ仔稚魚の扁平石の輪紋は，基本的には以下のように観察できた。扁平石の中心部に黒く見える核が存在し，その外側から縁辺に向かって連続的に輪紋が形成されていた（図５－４）。個々の輪紋は，透過光で明るく見える成長層と呼ばれる部分と，暗く見える不連続層と呼ばれる部分によって構成され，これらが交互に外側に向かって規則的に配列している。一般に成長層はカルシウムを豊富に含む層であるのに対し，不連続層はタンパク質などの基質が豊富で相対的にカルシウム含有量が少ない層である（麦谷　1988）。

仔魚の扁平石では，光学顕微鏡で下側から透過光を当てることにより中心部の核と日輪を容易に観察することができた。この時期には日輪もほぼ真円状で，耳石日輪計測システムによる輪紋数の計数も容易に行うことができた。1996年と1997年に採集した標準体長3.3－7.6㎜のカツオ仔魚15個体の日輪数は３－９本で，輪紋間隔は２－４㎛と狭かった。体長10㎜以上になると輪紋形状も前後方向に長い楕円状となり，一般に第５－６番目の日輪以降の輪紋間隔は外側に向かって５から15㎛までと次第に拡大していった。標準体長15－35㎜のカツオでは，輪紋間隔は外側に向かってさらに広くなり，第10日輪以降の輪紋間隔は15－40㎛となった（図５－５）。この時期の輪紋の一般的な特徴は，不連続層の幅が広く，成長層と同じぐらいか場合によ

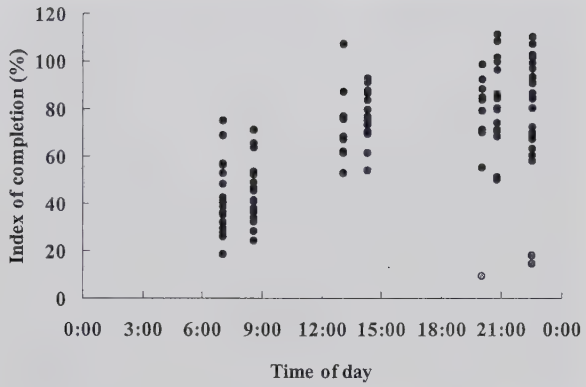


Fig. 5-6. Diel change in the index of completion (C) of the marginal increment of the saggital otolith for juvenile skipjack. $C(\%) = Wn/[(W_{n-1}+W_{n-2})/2]\times 100$; Wn, width of the marginal increment; W_{n-1}, width of the previous complete increment that exists inside of the marginal one; W_{n-2}, width of the previous complete increment that exists inside of the W_{n-1}.

っては成長層よりも広い個体も見られた。各日輪の間には，扁平石の成長が速くなるにつれほぼすべての個体において複数の subdaily ring と考えられる微細な輪紋が認められ，その数は一般に第６－10日輪では２－３本，第10日輪以降では５－８本であった。カツオの扁平石は成長に伴って立体的で複雑な形状を呈するようになるため，大型個体ほど輪紋観察は難しくなった。

輪紋形成周期の検証

縁辺成長の解析に用いたカツオ稚魚が採集された時刻は，朝７時台と８時台，午後１時台と２時台，夜８時台と10時台であった。供試魚の輪紋数は12－16本であった。

カツオ稚魚での縁辺成長の経時変化を観察したところ（図５－６），一般に早朝から夕方にかけて成長層の形成が進行し，夕方から夜間には不連続層が形成される明瞭な傾向が認められた。これらが１対となって，縁辺部に新たな日輪が完成する。といっても各時間帯における縁辺成長率の個体差はいずれも大きく，個体によって日輪形成の進行速度にはかなりのばらつきが存在した。夜８時に採集された稚魚のうちの１個体と夜10時30分に採集された稚魚の２個体，合計３個体については，最外輪紋が完成したあと，さらに新しい日輪の形成が始まった段階にあると判断したため，縁辺成長率の平均値を計算する際にはこれらの数値を除外した。また，個体によっては縁辺成長率が計算上100%を超える数値（101.0－110.6）を示す個体が10個体あったが，これらはすでに完成している輪紋の幅（縁辺成長率の計算に用いた最外輪紋の内側１番目と２番目の輪紋幅の平均値）よりも最外輪紋の幅が広くなっていたために起こった現象である。

朝７時台に採集されたカツオ稚魚21個体の縁辺成長率は，18.3－74.7%（平均41.0%），８時台の19個体では24.1－70.8%（平均45.3%）で，この時間帯に採集された多くの個体の縁辺成長率が50%に達しておらず，成長層の形成が進行途中にあった。午後１時台の10個体では，52.4－107.0%（平均73.3%），2時台の14個体では53.6－92.4%（平均76.8%）で，これらの時間帯にはすべての個体の縁辺成長率が50%を越え，平均値ではすでに最外輪紋形成の４分の３が完了した状態にあった。夜８時台では，8時に採集された11個体の縁辺成長率が54.7－98.1%（平均80.4%），8時45分に採集された19個体では，49.7－110.6%（平均82.9%）に達した。さらに，夜10時30分に採集された28個体での縁辺成長率は58.0－109.8%，平均86.8%に達し，多くの個体で最外輪紋の完成に近い状態にあることを表していた。

耳石日輪解析による仔稚魚期の成長

１）耳石半径と体長との関係

カツオ仔稚魚の扁平石の耳石半径と標準体長との関係をプロットし，これに１次回帰直線を当てはめて図５－７に示した。1994年の仔稚魚230個体のデータでは，回帰式の傾きが0.12で，決定係数0.97の高い相関関係が得られた。1995年の仔稚魚246個体のデータでも決定係数が0.96と高い相関関係が得られ，回帰式の傾きは0.13であった。1994年と1995年の回帰直線の傾きには有意差は認められなかった。1996年と1997年の仔魚については，データ数が少ないために15個体分をまとめて１つの回帰式に当てはめた結果，決定係数は0.86と高い相関関係が得られ，傾きは0.08であった。

２）日齢，ふ化日

1994年採集の仔稚魚397個体の中から285個体について，1995年採集の仔稚魚399個体の中から248個体について，日輪計数データを得ることができた。1996年および1997年採集の仔魚については，供試した３個体および12個体全てについてそれぞれ日輪数を計測した。1994年と1995年採集の仔稚魚について，日輪計数個体の体長組成を図５－８に示す。日輪計測魚の体長範囲は，1994年8.6－49.6㎜，1995年8.6－57.7㎜，1996年3.4－5.3㎜，1997年3.3－7.6㎜であった。1994年の計測魚では，標準体長10－15㎜が全体の58%を占めていたが，1995年の計測魚では標準体長15－20㎜が全体の32.3%と最も多かった。

調査魚の日齢組成を図５－９に示す。Radtke(1983)によれば，カツオの仔魚ではふ化した翌日に第１輪が

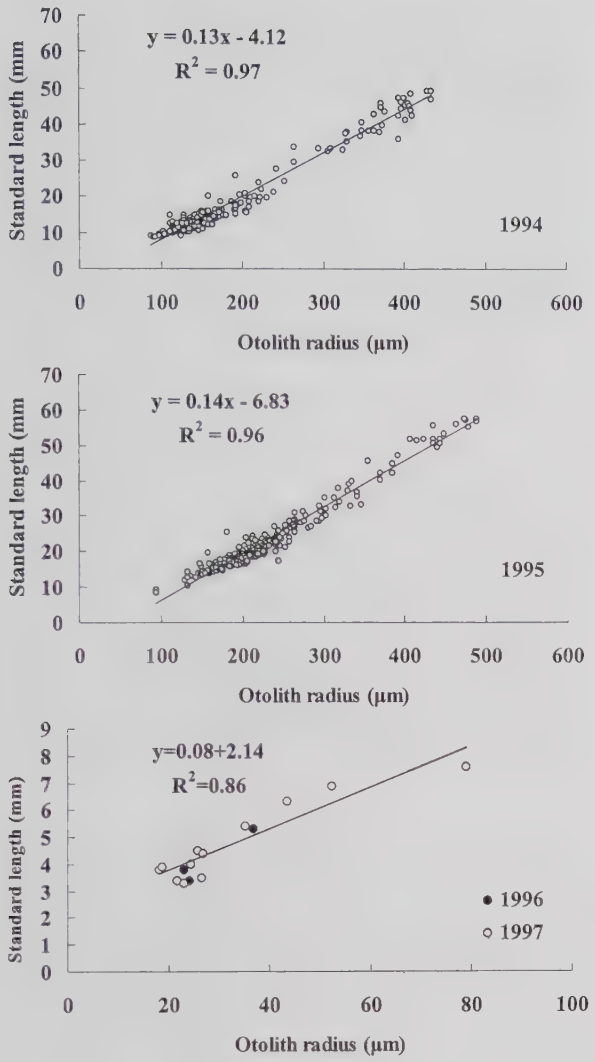


Fig. 5-7. Relationship between standard length of skipjack tuna and the sagittal radius.

形成される。したがって，日輪数はそのまま日齢に置き換えることができる。各年の日齢範囲は，1994年９－24日，1995年９－29日，1996年６－８日，1997年３－９日であった。1994年には日齢12日に，1995年では日齢14日にモードがあり，それぞれ全体の21.7%および30.2%を占めていた。

1994年および1995年採集の仔稚魚について，日齢から逆算してふ化日を求め，ふ化日組成を求めた（図５－10）。1994年のふ化日は10月23日から11月23日までの32日間で，最も多かったのは11月18日の14.3%であった。1995年のふ化日は10月19日から11月22日までの35日間で，最も多かったのは11月11日と12日のそれぞれ14.1%であった。これらの結果は，1ヶ月の間にカツオの産卵・ふ化にいくつかのピークのあることを示している。1994年と1995年の両方の年に規模の異なる４回のピークがそれぞれあったことが読みとれる。

３）体長と日齢との関係

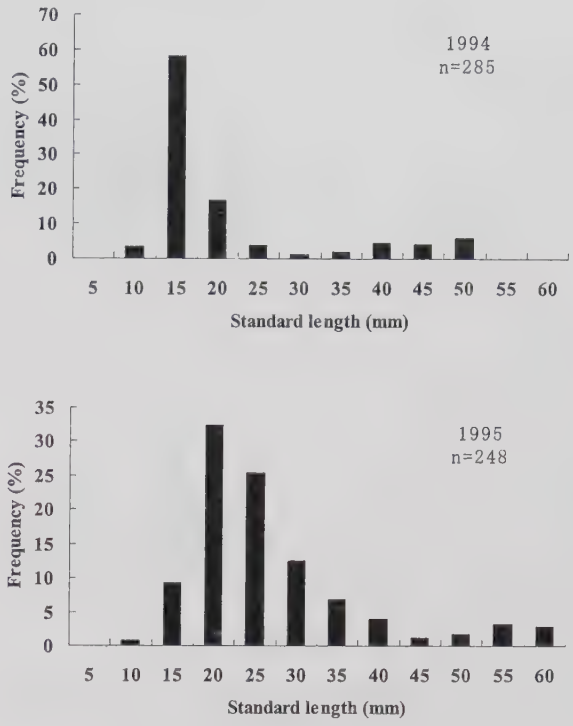


Fig. 5-8. Length-frequency distribution of skipjack tuna that were collected in November to December 1994 (top) and 1995 (bottom) and were used for the otolith increment analysis.

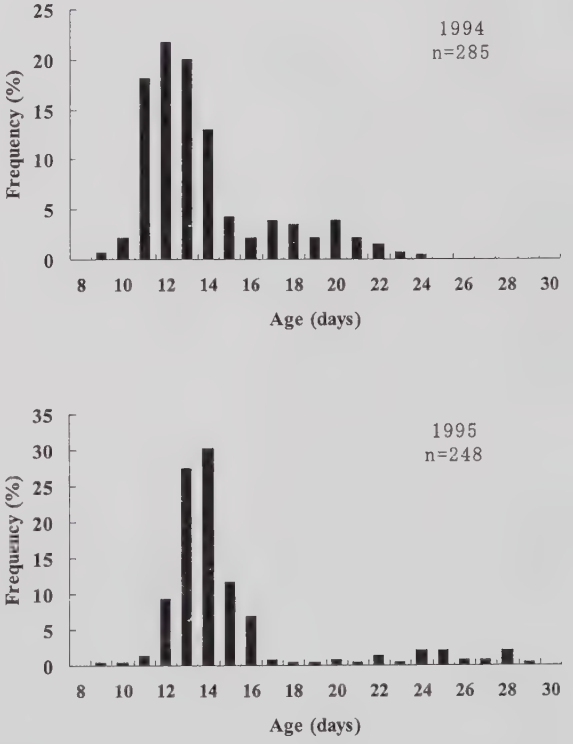


Fig. 5-9. Frequency distribution of age (days after hatching) estimated by the daily increment analysis for skipjack tuna.

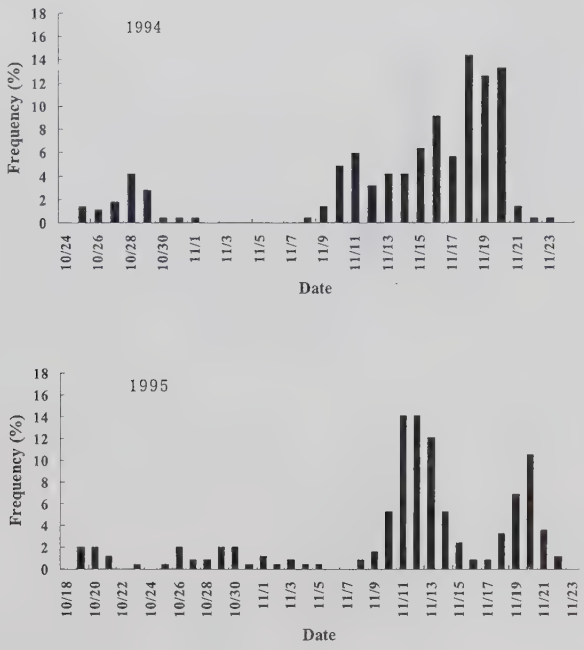


Fig. 5-10. Frequency distribution of the birthday estimated by the daily increment analysis for skipjack tuna.

1994年11－12月に採集した仔稚魚と1995年11－12月に採集した仔稚魚について，採集位置ごとに標本数と標準体長，日齢とそこから逆算して求めたふ化日を表5－2に示した。各調査点の日齢データ数は，1994年の仔稚魚について7調査点で1－142個体，1995年の仔稚魚については5調査点で14－112個体と，調査点によってデータ数が異なっているが，これは調査点による採集標本数の違いを反映しているためである。日齢データが得られた標本の体長範囲も調査点ごとに異なっている。

カツオ仔稚魚の日齢と体長との関係を採集位置ごとにプロットし，それぞれに対して1次回帰直線を当てはめた結果を図5－11a および図5－11b に示した。1994年11－12月に採集した仔稚魚のうち，調査点94108については標本数が1個体であるためこの図には含めなかった。同一日齢での各個体の標準体長を比較すると，どの調査点でも大きな個体差が見られた。1994年の仔稚魚では，St94110の17日齢の個体間で15.9㎜の体長差が観察された。以下同様に，St94202の13日齢で6.1㎜，St94207の13日齢で5.6㎜，St94208の14日齢

Table 5-2. Composition of size, age, and birthday for skipjack tuna estimated by the daily increment analysis.

1994 years

Stations	Locations	No. of samples	Size (mean) (㎜ SL)	Age (mean) (days old)	Birthday (collected) (month. day)
94108	3°N, 140°E	1	24.0	15	10.25 (11.09)
94110	7°N, 141°E	35	12.2－33.8 (19.1)	10－17 (14.2)	10.25－11.01 (11.11)
94202	11°N, 147°30E	34	9.2－18.6 (13.0)	9－15 (12.4)	11.08－11.14 (11.23)
94207	3°N, 152°30E	23	10.2－16.3 (13.0)	12－15 (13.6)	11.14－11.17 (11.29)
94208	3°N, 155°E	142	8.6－25.8 (13.2)	9－17 (12.0)	11.14－22 (11.30－12.01)
94210	7°N, 157°E	46	32.6－49.6 (41.9)	16－24 (19.5)	11.09－11.17 (12.03)
94214	15°N, 155°E	5	8.9－18.7 (12.7)	14－17 (16.0)	11.20－11.23 (12.07)

1995 year

Stations	Locations	No. of samples	Size (mean) (㎜ SL)	Age (mean) (days old)	Birthday (collected) (month. day)
95105	6°N, 137°20E	14	18.6－27.3 (22.3)	12－16 (14.9)	10.19－10.23 (11.04)
95204	3°N, 150°E	29	31.3－57.7 (47.3)	18－29 (24.1)	10.25－11.05 (11.23)
95205	2°N, 154°E	112	13.3－42.3 (23.3)	12－17 (13.8)	11.08－11.14 (11.25－26)
95206	5°N, 155°E	30	8.6－31.2 (19.2)	9－14 (12.7)	11.13－11.18 (11.27)
95208	11°N, 155°E	63	12.9－34.4 (18.6)	11－16 (13.7)	11.17－11.22 (12.03－04)

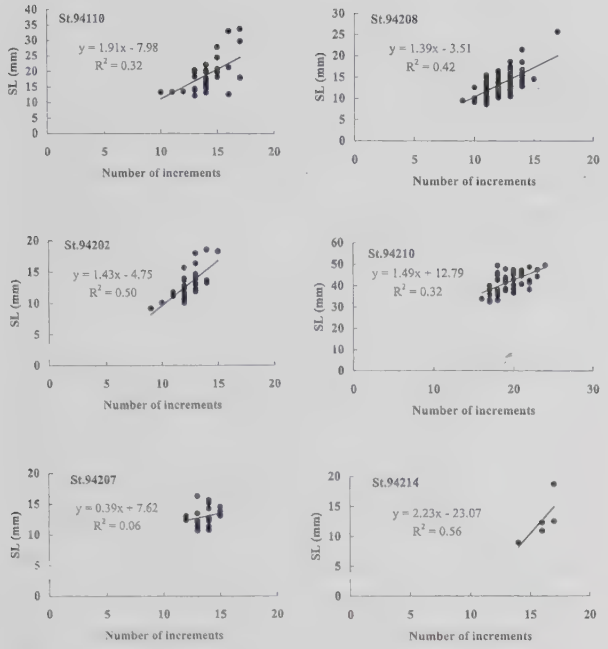


Fig. 5-11a. Relationship between standard length and number of increments of sagittal otolith by sampling locations for skipjack tuna in November to December 1994.

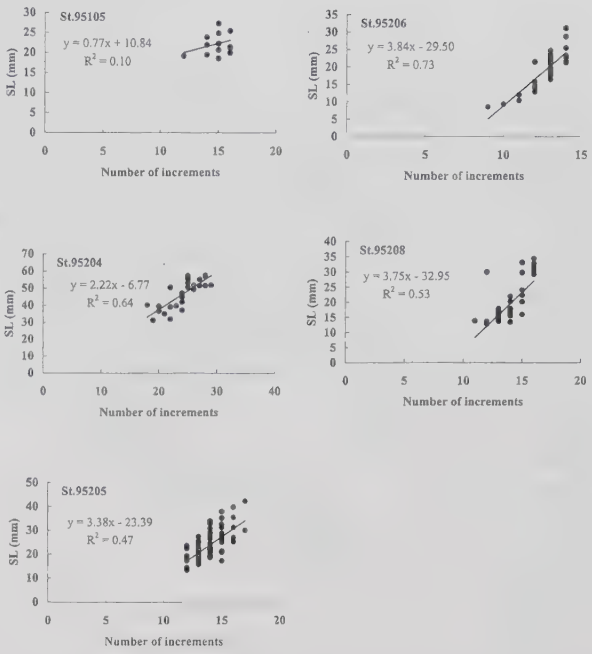


Fig. 5-11b. Relationship between standard length and number of increments of sagittal otolith by sampling locations for skipjack tuna in November to December 1995.

で8.6㎜, St94210の18日齢で16.1㎜, St94214の17日齢で6.2㎜, 1995年の仔稚魚では, St95105の15日齢で8.7㎜, St95204の22日齢で18.6㎜, St95205の15日齢で20.7㎜, St95206の14日齢で9.9㎜, St95208の15日齢で17.1㎜であった。各調査点での回帰直線の傾き，つまり成長速度は, 1994年には0.06－2.23, 1995年には0.47－3.84で調査点によって異なっていた。これらの結果から，カツオの仔稚魚の成長は，個体間でも，年および海域によっても大きな差があることが明らかとなった。

日齢と標準体長との関係を用いて，カツオの仔魚期から稚魚期における成長過程を明らかにする。稚魚期への移行期前後から標準体長50㎜台までの成長については1994年と1995年の仔稚魚から得られた日齢データから，仔魚期については1996年と1997年の仔魚から得られた日齢データを使用した。図5－12にそれぞれのデータをプロットし, 1次回帰直線を使って仔稚魚の成長を推定した。ただし，仔魚については標本数が少なかったために, 1996年と1997年のデータを合わせて扱った。カツオ仔魚の成長は，標準体長3.3－7.8㎜（3－9日齢）では1日平均0.55㎜程度の緩やかなものであることがわかる。一方，ふ化後10－12日で稚魚へ移行し, その後の成長は仔魚期よりも速く, 1994年のデータでは1日平均3.3㎜（24日齢で標準体長52㎜), 1995年のデータでは1日平均2.5㎜(29日齢で標準体長59㎜)となった。このことから，稚魚期に入ってからのカツオが1日に2－3㎜の急速な成長を遂げることが明らかになった。1994年の回帰直線の傾きは, 1995年よりも明らかに大きかった（$p<0.05$)。

耳石の成長と体成長に直線関係があることから（図5－7)，扁平石の各日輪の中心からの距離を調べることにより，個体の体成長を推定した。図5－13に16日齢で体長の異なる3個体を使って，個体ごとの成長過程の違いを追跡した。3個体中成長速度の最も速い個体では, 5日齢の段階ですでに他の個体よりも成長が良くなっていたと見られ，最も成長の遅い個体との差は，その後16日齢まで拡がっていった。一方, 2番目に成長の良かった個体では, 10日齢までは最も成長の遅かった個体と成長差が見られなかったが, 11日齢以降成長速度が速くなり，最も成長の遅い個体との差が拡がっていったと考えられた。

考　　察

西部太平洋熱帯海域におけるカツオの初期成長様式

カツオの仔稚魚期における成長については，第1章で述べた如くこれまでに報告例がほとんどなかった。ところが，近年魚類の耳石に形成される日輪を読みとることにより（Panella 1971)，日齢単位で成長過程を追跡し，それぞれの種における成長様式を解明することが可能になった。そこで，カツオの初期成長研究においても耳石日輪の解析法を取り入れることにより，パラオ・ミクロネシア周辺の熱帯外洋表層域に生息するカツオの仔魚期から稚魚期にかけての成長様式を明らかにした。本研究結果によるカツオの初期成長

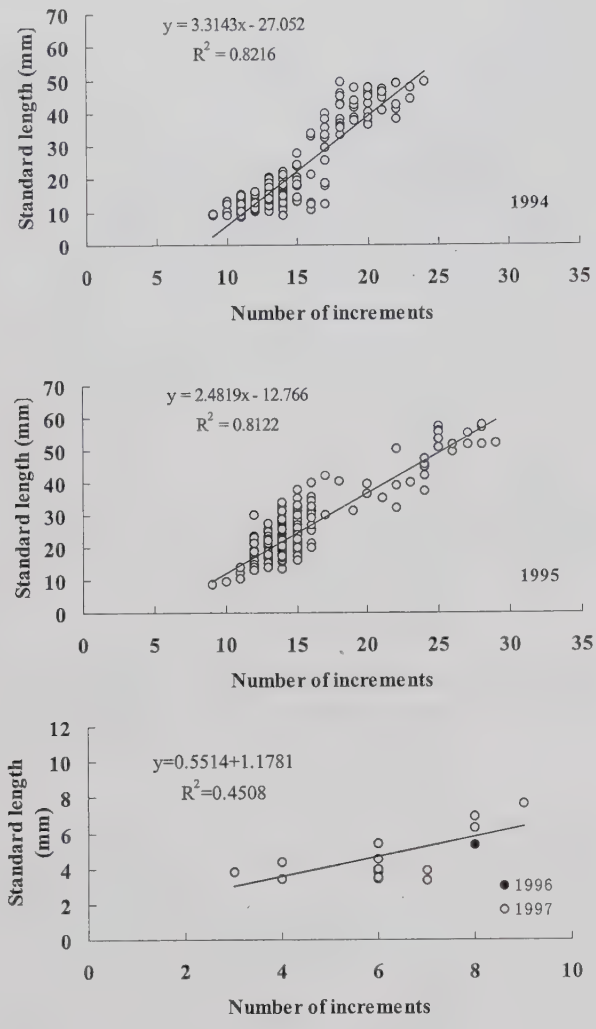


Fig. 5-12. Relationship between standard length and number of increments of sagittal otolith by sampling years for skipjack tuna estimated by the otolith increment analysis.

は,10日齢前後までの仔魚期には1日0.5㎜程度で緩やかに進行していくが,10－12日齢で稚魚期への移行を終えた後は1日2－3㎜もの急激な成長を示し，ふ化後1ヶ月での体長は60㎜前後に到達するものと推定された。本種の初期成長の特徴として，その速さとともに同じ海域に生息する個体間でも，稚魚期への移行後の成長に顕著な個体差が生じることが明らかになった。

同じ調査点で採集された稚魚群の日齢査定からふ化日を逆算推定した結果，それぞれの調査点内で4－12日の違いがあることがわかり，同じ海域に分布するカツオ稚魚がふ化日の異なる個体の集まりによって構成されることが示された。また，各年のふ化日組成からは本研究海域におけるカツオ仔魚の長期間にわたるふ化が確認され，これまで仔稚魚の季節別出現状況（西川ら 1985）や成熟魚の分布（永沼 1979）から推定されていた西部太平洋熱帯域における本種の長期間に

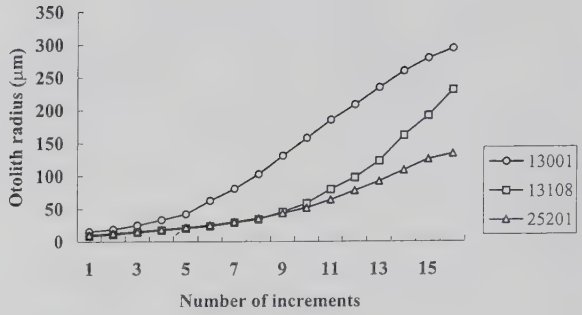


Fig. 5-13. Distance from the core to the margin for the saggital otolith of skipjack juvenile at 16 days old. Data of three individuals from November－December 1994 samples were shown. No.13001, 33.1㎜ SL；No.13108, 21.3㎜ SL；No.25201, 10.9㎜ SL.

わたる連続的な産卵活動が，耳石日輪解析法を用いた本研究結果によっても支持された。

サバ科魚類の初期成長は一般に他の浮魚類に比べて著しく速いことが知られており，サワラでは最初の1ヶ月間で100㎜に達した例もある（福永ら 1982）。このようなカツオとその近縁種にみられる短期間での急激な成長は，後期仔魚期から発現する巨大な口と鋭い歯，大きな眼などの形態的な発達とともに，魚体内部における消化器系の発達と密接に関係していると考えられている（Tanaka *et al*. 1996）。カツオにおける魚食性の発現は，マグロ類の中でも比較的早く（Young and Davis 1990），胃盲嚢や幽門垂などの消化器系の発達も他のマグロ類より早い時期に完成するものと考えられている（西川 1979）。カツオは生活史の早い段階から外部形態と内部器官が魚食性に適合した状態になることで，効率よく大型の餌生物を捕食することが可能となる。本研究の第4章で明らかになったように，稚魚期においても生息海域に関係なく最も優占的な餌生物が魚類仔魚であることから，魚食性が稚魚期以降の急激な成長を支えているものと考えられる。一方，本研究の第3章では稚魚期の鉛直分布に関して水深40－120m層を中心に生息していることを明らかにしたが，この水深層は他の層に比べて動物プランクトンやマイクロネクトンの生物量も多いことから，カツオ稚魚が餌生物を捕食する上でも有利になると考えられる。このことは同時にカツオ稚魚の捕食者との遭遇確率を増すことにもつながるが，彼らの捕食者の種類はごく少数の魚食性魚類に限られるため，餌生物を得るというプラス面の方が捕食者からの攻撃というマイナス面より大きな意味をもつと推察される。したがって，本種が食性の面からだけでなく稚魚期における鉛直分布の面からも，初期の急速な成長を可能にするような特性をもっているものと考えられる。

カツオの初期成長と生残戦略

カツオが初期生活史において主な生息域とし，成長の場として利用している熱帯の外洋表層域は，温帯域に比べて季節的な環境変動幅が小さいため，周年にわたり比較的安定した生息環境が保たれている反面，栄養条件としては温帯域よりも乏しいため全体的に餌生物量が少ない。本研究で明らかにされたカツオの初期成長様式，水平・鉛直分布特性や摂餌生態に関する知見から，このような環境条件をカツオがどのように利用し，個体の生き残りを目指しながら，その結果として資源の維持を保ってきたかという点について考える。

ふ化後最初の１ヶ月で体長60㎜前後に達する初期成長の速さは，餌の乏しい熱帯の外洋表層域において魚類仔魚を主食することで支えられている。生活史上最も生活能力が弱く減耗の激しい時期をできる限り短い期間で通過し，稚魚期，幼魚期へと生活史段階を進めている。魚食性を中心とするカツオにとって，サイズが大きい個体ほど生態系内での食物連鎖における地位を高め，より高次の捕食者として位置することにつながる。一方，本研究結果において稚魚期の成長には顕著な個体差が生じることが示されたが，このことは共食いを引き起こす原因にもなると考えられる。本研究の第４章でも示したように，カツオの初期生活史における共食いは一般的に見られる現象であり，熱帯域での周年にわたる連続的な再生産活動があらゆるサイズの仔稚魚を共存させており，それらの間での共食いを可能にしている。成長の遅い個体にとってはこのような環境は生き残りに不利と見られるが，一方で成長の速い個体に共食いされることで他者の成長と生残を支えることにもつながると考えられる。

生き残りに成功した個体は成長に伴う遊泳能力の発達によって移動範囲を拡大させることが可能になり，やがて近くに生息していた個体が集まった結果，至る所で生活単位としての魚群を形成するようになる。ふ化日の異なる個体によって構成された各魚群は，ある程度の成長を遂げると餌生物の豊富な温帯域を目指して回遊行動を起こすようになり，やがて日本近海への来遊群が形成されていくと考えられる。このようなカツオの生活史戦略は現在のところまだ仮説の段階であるが，今後幼魚や成魚を含めた耳石日輪の解析を行って，初期の成長と生き残り過程を調べることにより検証可能と考えられる。これらを明らかにすることにより，西部太平洋熱帯域を対象としたカツオ資源への加入機構を解明することができると考えられる。

要　　約

カツオは全世界の熱帯から温帯にかけての広大な外洋表層域に分布しており，日本をはじめ世界各地のまき網，竿釣り漁業によって広く漁獲される水産上重要な魚種である。しかしながら，漁業資源に加入する以前の生態に関しては，仔魚期の知見が若干あるものの，稚魚期から幼魚期における生態はほとんど未知のままである。

本研究は，西部太平洋におけるカツオ資源の加入機構を解明し，資源管理の基礎を築くために，稚魚・幼魚期の生態学的知見を得ることを目的として行った。

１．幼稚魚採集法の開発

カツオ幼稚魚を採集するために，TANSYU 型中層トロールと呼称される網口20×20m，全長72m，目合1000～57㎜（コッドエンド部13.6mの目合８㎜），最大曳網速度５ノットの採集漁具を設計・製作した。これを用いて1992年から５年間，10月下旬から12月中旬に西部北太平洋熱帯域（０～20°N，130～160°E）で調査航海を行い，497回の曳網で6724個体（１回の採集個体数０～1163個体，体長６～172㎜）のカツオ幼稚魚の採集に成功した。これにより，これまで不可能であったカツオ幼稚魚の大量採集法を初めて確立した。

TANSYU 型中層トロールによれば，海面付近から水深300mまで音響機器により常時曳網水深をモニターしつつ層別採集が可能であり，これまでの漁具にはない優れた採集能力を備えることが明らかになった。また，マグロ属幼稚魚の採集結果（体長８～140㎜，1時間当たり採集個体数０～128個体）から，TANSYU 型中層トロールはカツオだけでなくマグロ類，サケ・マス類など他の外洋性大型浮魚類の幼稚魚採集にも有効であることが示された。

２．採集結果の概要

各年のカツオ幼稚魚の総採集回数当たり出現率は41～58%と高く，比較的年変動が小さかったが，１時間曳網当たり平均採集個体数では３～39個体と年変動が大きかった。曳網水深０～300mのうち，40～80m層と80～120m層で全体の44%および34%がそれぞれ採集され，他の層（０～40m，120～200m，200～300m）での採集個体数は１～13%と少なかった。曳網時刻別の１時間曳網当たり平均採集個体数では，日出後の06～10時の113個体が圧倒的に多く，10～14時，14～18時，18～22時，22～02時には８～11個体であったが，日出前および直後の02～06時は１個体で最も少なかった。時刻別出現率でも，02～06時は22%で最も低かったが，他の時間帯では昼間47～54%，夜間は47～48%で昼夜による差はなかった。曳網速度別の採集効率は，昼間は最も速い5.5ノットでの採集量が最も多かったが，

夜間には4.5ノットで最大となった。

3．分布様式と環境要因

カツオ幼稚魚採集時の水温・塩分と流向・流速の鉛直観測データの解析から，幼稚魚分布域の物理環境要因を明らかにし，研究海域を北赤道海流域，境界域，北赤道反流域に区分した。中層トロールでの採集データからカツオの出現率，分布密度を海域別に求め，海洋物理学的環境要因との関係を調べた。

カツオ稚魚は北赤道海流域と北赤道反流域およびそれらの境界域に広く分布し，表層混合層下部から水温躍層上部を中心に生息していることを明らかにした。稚魚の海域別の総採集回数当たり出現率と1時間曳網当たり平均採集個体数は，北赤道反流域でそれぞれ61%，17個体と最も高く，境界域で35%，6個体，北赤道海流域で32%，15個体であった。稚魚の水平分布様式は年によって異なり，1992年と1994年は南高北低型，1995年は東偏型，1993年と1996年は海域的な偏りの少ない広範囲型の分布であった。幼魚は北赤道反流域のみで採集され，表層混合層下部を中心に分布した。カツオの鉛直分布は，成長とともに変化し，北赤道反流域の昼間のデータによれば，稚魚への移行期の体長10㎜前後では0～200m，移行後の体長10～40㎜の個体も0～220mに分布した。しかし，体長50～60㎜に成長すると60～140m，さらに70～80㎜になると90m前後の層に集中分布するようになった。稚魚の鉛直分布は海域の水温鉛直構造によく対応しており，水温躍層の浅い海域ではカツオの分布水深も浅くなり，深い海域では深くなった。中層トロールによる全採集生物の水深別分布密度とカツオ稚魚の鉛直分布密度はよく対応しており，カツオ稚魚が他の生物の生物量が多い水深を中心に生息していることが分かった。一方，近縁のマグロ属稚魚（キハダ，メバチ）は主に北赤道反流域の表層混合層（水深80m以浅）に分布し，カツオとは明らかに分布深度が異なっていた。カツオ稚魚の分布域は，主として水温20～29℃，塩分33.6～35.5PSUであったのに対し，マグロ属稚魚は水温26～29℃，塩分33.6～33.7PSUと高水温・低塩分域に分布していたことから，熱帯の外洋表層域においてこれら近縁種の稚魚の棲み分けが行われていることが明らかとなった。

4．食性と摂餌行動の日周性

北赤道海流域と北赤道反流域で採集したカツオ稚魚とマグロ属稚魚の胃内容物を分析し，各餌動物群の出現率（重量%，個体数%，頻度%）から相対的重要度指数〔IRI＝(重量%＋個体数%)×頻度%〕を計算することにより，それぞれの餌としての重要性を評価した。魚類仔魚のIRIは北赤道海流域で14107，北赤道反流域で10852と圧倒的に高い値を示し，カツオ稚魚の基本的な餌は魚類仔魚であることを明らかにした。両海域の種類不明消化物のIRIは魚類仔魚についで2番目に高く，それぞれ214.4と346.5であったが，実体顕微鏡下での観察によりこれらの多くは消化の進んだ魚類仔魚であることが分かった。このほか，北赤道海流域ではオキアミ類（IRI＝162），端脚類（9.2），カイアシ類（0.3）が出現し，北赤道反流域ではカイアシ類（IRI＝158.4），頭足類（66.8），オキアミ類（24.8），ヤムシ類・等脚類・魚卵（11.6），端脚類（2.1）が出現したことから，北赤道反流域の方が多様な餌生物を捕食していることが明らかとなったが，これらの餌料生物としての価値は低かった。

胃内容物重量指数，充満度，消化度の経時変化から，カツオ稚魚の摂餌活動の日周性を調べた。空胃個体の割合は，22～02時には100%，02～06時には80%を占めたが，日出後急速に減少し，日没前の14～18時に5.3%で最小となった。これとは対照的に，充満個体の割合は14～18時に最大値60.6%を示し，22時以降06時まで0%を示した。胃内容物重量指数および消化度指数も14～18時に最大値を示し，日出前に最小値となった。したがって，カツオ稚魚は朝から夕方にかけて摂餌活動を行い，夜間には摂餌を行わない典型的な視覚捕食者であることが分かった。一方，マグロ属稚魚の餌生物は海域によらず魚類仔魚の出現率が圧倒的に高く，その他はオキアミ類と頭足類がわずかに出現しただけで，カツオよりも魚食性が強いことが明らかになった。マグロ属稚魚の摂餌活動はカツオ同様に昼間に行われ，視覚捕食を行っていると考えられた。

5．初期の成長様式と生き残り戦略

カツオの初期成長を明らかにする目的で，1994年～1997年に採集した仔稚魚の耳石を用いて，光学顕微鏡と画像計測の可能な耳石日輪計測システムにより耳石輪紋の計測を行い，縁辺成長率の経時変化により，稚魚期における耳石の輪紋が1日1本できる日輪であることを証明した。

仔稚魚548個体（体長3.3～57.7㎜）の耳石日輪を用いて，日輪数と体長との関係を求め，仔魚期から稚魚期における成長速度を調べた。1996年と1997年の体長3.3～7.8㎜の仔魚15個体（3～9日齢）では，0.55㎜/日の緩やかな成長を示した。1994年の仔稚魚285個体（9～24日齢）では3.3㎜/日，1995年の仔稚魚248個体（9～29日齢）では2.5㎜/日と急速な成長を示し，ふ化後1ヶ月で体長60㎜前後に成長することが明らかとなった。カツオ仔魚は，ふ化後10～12日で稚魚期に移行し急速に成長速度を速めるとともに，この時期から成長

に顕著な個体差が現れ始めた。また稚魚期の成長は，年および海域によっても大きな差があることが明らかになった。耳石日輪の中心からの距離を解析し，初期成長のよかった個体はふ化後5日目以降に成長速度が急速に速くなることが分かった。初期生活史における急速な成長は，餌サイズの大型化を保証し，餌条件の不利な熱帯の外洋表層域での生残率を高め，個体群の維持にとって重要な意味をもつと考えられた。

謝　辞

本論文の執筆に際し，懇切丁寧な御指導と御鞭撻をいただいた東京大学海洋研究所の川口弘一教授に心から感謝申し上げる。東京大学海洋研究所の杉本隆成教授，渡邊良朗教授，河村知彦助教授，東京大学農学部の青木一郎教授には，審査員として有益な助言を与えていただいた。本研究の計画と実施にあたり，東北区水産研究所資源管理部浮魚資源第2研究室（当時）の元室長永沼璋氏をはじめ，渡辺洋博士，小倉未基博士，浅野政宏氏，高橋未緒氏には様々な面から暖かい御支援をいただいた。遠洋水産研究所浮魚資源部の西川康夫博士にはカツオ仔稚魚の種査定を，張成年博士にはマグロ属稚魚の種査定をお願いし，東北区水産研究所海洋環境部（当時）の清水勇吾氏にはCTDおよびADCPデータの解析をしていただいた。遠洋水産研究所の長澤和也博士には，研究の遂行と論文の執筆にあたり多くのご教示をいただいた。ここに記して深く感謝申し上げる。

兵庫県立香住高等学校の漁業実習船但州丸の丹生孝道船長と乗組員の方々，山口県立水産高等学校の漁業実習船青海丸の安河内隆船長（当時），中島照久船長と乗組員各位には，カツオ幼稚魚の採集をはじめとした調査活動を技術面で支えていただいた。ミクロネシア連邦共和国政府，パラオ共和国政府の関係各位には，自国200カイリ経済水域内での調査活動に対し充分な理解とご協力を賜った。水産庁資源課国際資源班（当時）各位には，カツオ幼稚魚調査の実施を物心両面からご支援いただいた。これらの方々に対して，心からお礼申し上げる。

引　用　文　献

相川広秋（1937）カツヲ群の一考察．日水誌．**6**，13－21．

相川広秋・加藤益夫（1937）魚類の年齢査定（予報1）．日水誌．**7**，13－21．

AlversonF. G.（1963）The food of yellowfin and skipjack tunas in the eastern tropical Pacific ocean. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm. Bull. **7**, 295－396.

青木光義（1999）カツオ仔稚魚の食性．東海大海洋研研報．**20**，173－185．

Barraclough, W. E., Johnson, W. W.,（1956）A new mid-water trawl for herring. Fish. Res. Bd. Canada Bull. **104**, 1－25.

Batts, B. S.（1972）Food habits of the skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, in the north Carolina waters. Chesapeake Sci. **13**, 193－200.

Batts, B. S.（1972）Age and growth of the skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*（Linnaeus），in north Carolina waters. Chesapeake Sci. **13**, 237－244.

Bayliff, W. H.（1988）Growth of skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, and yellowfin, *Thunnus albacares*, tunas in the eastern Pacific ocean, as estimated from tagging data. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm. Bull. **19**, 311－385.

Boehlert, G. W., Mundy, B. C.（1994）Vertical and onshore-offshore distributional patterns of tuna larvae in relation to physical habitat features. Mar. Ecol. Prog. Ser. **107**, 1－13.

Chi, K. S., Yang, R. T.（1973）Age and growth of skipjack tuna in the waters around the southern part of Taiwan. Acta Oceanogr. Taiwan. **3**, 199－221.

Chow, S., Inoue, S.（1993）Intra-and interspecific restriction fragment length polymorphism in mitochondrial genes of *Thunnus* tuna species. Bull. Nat. Res. Inst. Far Seas Fish. **30**, 207－225.

Davis, T. L. O., Jenkins, G. P., Young, J. W.（1990）Diel patterns of vertical distribution in larvae of southern bluefin *Thunnus maccoyii*, and other tuna in the East Indian Ocean. Mar. Ecol. Prog. Ser. **59**, 63－74.

Davis, T. L. O., Jenkins, G. P., Yukinawa, M., Nishikawa, Y.（1989）Tuna larvae abundance : comparative estimates from concurrent Japanese and Australian sampling programs. Fish. Bull. **87**, 976－981.

Dizon, A. E., Brill, R. W., Yuen, H. S. H（1978）Correlations between environment, physiology, and activity and the effects on thermoregulation in skipjack tuna. The physiological ecology of tunas. Academic Press. 233－259.

Dragovich, A.（1970） The food of skipjack and yellowfin tunas in the Atlantic Ocean. Fish. Bull. **68**, 445－460.

Dragovich, A.（1971）Food of skipjack tuna in the Caribbean Sea and adjacent oceanic waters. FAO Fish. Rep. **71**, 27－40.

Dragovich, A., Potthoff, T.（1972）Comparative study of food of skipjack and yellowfin tunas off the coast of west Africa. Fish. Bull. **70**, 1087－1110.

Eckles, H. H.（1949）Observations on juvenile oceanic skipjack（*Katsuwonus pelamis*）from Hawaiian waters and sierra mackerel（*Scomberomorus sierra*）from the eastern Pacific. Fish. Bull. **51**, 245－250.

Food and Agriculture Organization（1999）FAO yearbook, fishery statistics, catches and landings. **84**, 321－323.

福永辰広・石橋矩久・三橋直人（1982）サワラの採卵およ

び種苗生産．栽培技研．**11**，29－48.

Gartner Jr., J. V.（1991）Life histories of three species of lanternfishes（Pisces：Myctophidae）from eastern Gulf of Mexico. Mar. Biol. **111**, 11－20.

Higgins, B. E.(1970) Juvenile tunas collected by midwater trawling in Hawaiian waters, July-September 1967. Trans. Amer. Fish. Soc. **99**, 60－69.

Higgins, B. E.（1967）The distribution of juveniles of four species of tunas in the Pacific Ocean. Proc. Indo-Pacific Fish. Counc. 12th Sess. Sect. **2**. 79－99.

堀田秀之（1953）薩南海域の幼魚の分布について．東北水研研報．**2**，19－21.

堀田秀之・小川　達（1955）海区別カツオの食餌組成について．東北水研研報．**4**，62－82.

Hunter, J. R., Macewicz, B. J., Sibert, J. R.（1986）The spawning frequency of skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, from the south Pacific. Fish. Bull. **84**, 895－903.

飯塚景記（1985）昭和59年度調査船照洋丸第２次航海報告書．ミクロネシア南部海域におけるカツオ幼魚，未成魚の分布調査．水産庁研究部.1－91.

飯塚景記・浅野政宏・永沼　璋（1989）南方カツオ（*Katsuwonus pelamis LINNAEUS*）の食性とカツオ幼魚の出現状況．東北水研研報．**51**，107－116.

岩井　保（1985）体形と遊泳様式．水産脊椎動物2．魚類．新水産学全集４．恒星社厚生閣．27－41.

岩井　保（1988）仔稚魚と変態．水産脊椎動物2．魚類．新水産学全集４．恒星社厚生閣．229－243.

Jenkins, G. P., Davis, T. L. O.（1990）Age, growth rate, and growth trajectory determined from otolith microstructure of southern bluefin tuna *Thunnus maccoyii* larvae. Mar. Ecol. Prog. Ser. **63**, 93－104.

Joseph, J., Calkins, T. P.(1969) Population dynamics of the skipjack tuna（*Katsuwonus pelamis*）of the eastern Pacific Ocean. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm. Bull. **13**, 1－273.

Josse, E., Le Guen, J. C., Kearney, R. E., Lewis, A. D., Smith, B. R., Marec, L., Tomlinson, P. K.(1979) Growth of skipjack. South Pac. Comm. Occas. Pap., **11**, 1－83.

海洋水産資源開発センター（1989）昭和62年度遠洋底びき網新漁場開発調査報告書．１－50.

川崎　健（1965）カツオの生態と資源．１．分類および分布，生態論．水産研究叢書８－１．日本水産資源保護協会．１－48.

川崎　健（1965）カツオの生態と資源．２．資源論，漁況論．水産研究叢書８－２．日本水産資源保護協会．１－108.

King, J. E., Ikehara, I. I.（1956）Comparative study of food of bigeye and yellowfin tuna in the central Pacific. Fish. Bull. **57**, 61－85.

King, J. E., Iversen, R. T. B.(1962) Midwater trawling for forage organisms in the central Pacific. Fish. Bull. 62, 271－321.

岸上謙吉（1926）大正14年に於ける叉骨類（シビ・カツオ）研究の概要．水産学会報．**4**，125－137.

気象庁海洋気象部（1995）気象庁海洋月報．**35**，７－11.

気象庁気候・海洋気象部（1996）気象庁海洋月報．**47**，３－16.

Leis, J. M., Trnski, T., Harmelin-Vivien, M., Renon, J. -P., Dufour, V., El Moudni, M. K., Galzin, R.(1991) High concentrations of tuna larvae（Pisces：Scombridae）in near-reef waters of French Polynesia（Society and Tuamotu islands）. Bull. Mar. Sci. **48**, 150－158.

Magnuson, J. J.（1969）Digestion and food consumption by skipjack tuna（*Katsuwonus pelamis*）. Trans. Amer. Fish. Soc. **98**, 379－392.

Magnuson, J. J.（1978）Locomotion by scombrid fishes：hydromechanics, morphology, and behavior. Fish Physiology 7 Locomotion. Academic press. 239－313.

Marr, J. C.(1948) Observations on the spawning of oceanic skipjack（*Katsuwonus pelamis*）and yellowfin tuna（*Neothunnus macropterus*）in the northern Marshall Islands. Fish. Bull. **51**, 201－206.

Matsumoto, W. M.（1958）Description and distribution of larvae of four species of tuna in central Pacific waters. Fish. Bull. **58**, 31－72.

Matsumoto, W. M.（1961）Collection and description of juvenile tunas from the central Pacific. Deep Sea Res. **8**, 279－285.

Matsumoto, W. M.（1975）Discription, relative abundance, and movement of skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, in the Pacific ocean based on Japanese longline catches, 1964－67. NOAA Tech. Rep. NMFS SSRF **695**, 1－30.

Matsumoto, W. M., Skillman, R. A., Dizon, A. E.（1984）Synopsis of biological data on NOAA Tech. Rep. NMFS Circ. **451**, 1－92.

Meekan, M. G., Fortier, L.（1996）Selection for fast growth during the larval life of Atlantic cod *Gadus morhua* on the Scotian Shelf. Mar. Ecol. Prog. Ser. **137**, 25－37.

Miller, J. M.（1979）Nearshore abundance of tuna（Pisces：Scombridae）larvae in the Hawaiian islands. Bull. Mar. Sci. **29**, 19－26.

森慶一郎（1972）マグロ延縄により漁獲されたマグロ・カジキ類の胃内容物として出現する数種のサバ型魚類の幼・稚魚の地理的分布と相対密度－Ⅰ．カツオ．遠洋水研報．**6**，111－157.

麦谷泰雄（1988）魚類耳石の日周形成リズム．水産動物の日周活動．水産学シリーズ69．恒星社厚生閣．35－46.

永沼　璋（1979）西部太平洋におけるカツオの産卵活動について．東北水研研報．**40**，１－13.

永沼　璋・浅野政宏（1987）昭和60・61年度調査船照洋丸航海報告書．マリアナ西部海域におけるカツオ幼魚の分布調査，ソロモン東部海域におけるカツオ幼魚の分布調査．水産庁研究部．１－164.

Nakamura, E. L.(1965) Food and feeding habits of skipjack tuna（*Katsuwonus palamis*）from the Marquesas and Tuamotu Islands. Trans. Am. Fish. Soc. **94**, 236－242.

Nakamura, E. L. Matsumoto, W. M.（1967）Distribution of larval tunas in Marquesan waters. Fish. Bull. **66**, 1－12.

二平　章（1996）潮境域におけるカツオ回遊魚群の行動生態および生理に関する研究. 東北水研研報. **58**, 137－233.

西川康夫(1975)カツオ仔稚魚の胃盲嚢の発達と摂餌状態. 遠洋水研報. **12**, 221－236.

西川康夫・本間　操・上柳昭治・木川昭二（1985）遠洋性サバ型魚類稚仔の分布, 1956－1981年. 遠洋水産研究所. S. Series **12**, 1－99.

西牟田力雄・大洋漁業株式会社・泰東製鋼株式会社(1990) NEAFC 水域における中層性アカウオを対象とした中層トロール網について（深海丸）. JAMARC. **37**, 48－57.

落合　明・田中　克（1998）カツオ類. 新版魚類学（下）改訂版. 恒星社厚生閣. 856－883.

沖山宗雄（1993）日本産稚魚図鑑. 東海大学出版会. 609－624.

Panella, G.（1971）Fish otolith：daily growth layers and periodical patterns. Science. **173**, 1124－1127.

Pinkas, L., Oliphant, M. S., Iverson, I. L. K.,(1971) Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters. Fish Bulletin. **152**, 1－139.

Radtke, R. L.（1983）Otolith formation and increment deposition in laboratory-reared skipjack tuna, *Euthynnus pelamis*, larvae. NOAA Tech. Rep. NMFS **8**, 99－103.

Reid Jr, J. L.（1962）On circulation, phosphate-phosphorous content, and zooplankton volumes in the upper part of the Pacific Ocean. Limnology and Oceanography. **7**, 287－306.

Roger, C.（1994）Relationships among yellowfin and skipjack tuna, their prey-fish and plankton in the tropical western Indian Ocean. Fish. Oceanogr. **3**, 133－141.

Shabotiniets, E. I.(1968) Age determination of Indian Ocean tunas. Tr. VNIRO. 64, Tr. AzcherNIRO **28**. 374－376.

Shimada, B. M.,(1951) Juvenile oceanic skipjack from the Phoenix Islands. Fish. Bull. **52**, 129－131.

Sibert, J. R., Kearney, R. E., Lawson, T. A.（1983）Variation in growth increments tagged skipjack (*Katsuwonus pelamis*). South Pac. Comm. Tuna and Billfish Assess. Prog. Tech. Rep. **10**, 1－43.

代田昭彦（1970）魚類稚仔魚期の口径に関する研究. 日水誌. **36**, 353－367.

代田昭彦（1978）魚類稚仔魚期の口径に関する研究. 2. 上顎長の魚種による特性. 日水誌. **44**, 1171－1177.

Sosa-Nishizaki, O., Shimizu, M., Nose, Y.（1989）The potential use of the second dorsal fin rays of skipjack tuna *Katsuwonus pelamis* as an aging character. Nippon Suisan Gakkaishi, **59**, 1559－1564.

Strasburg, D. W.(1959) An instance of natural mass mortality of larval frigate mackerel in the Hawaiian islands. J. Cons. Int. Explor. Mer. **24**, 255－263.

Strasburg, D. W.（1960）Estimates of larval tuna abundance in the central Pacific. Fish. Bull. **60**, 231－255.

須田　明（1953）マグロ・カジキ類の胃内容物中にみられるカツオ若年魚. 日水誌. **19**, 319－327.

Takeshita, K., Ogawa, N., Mitani, T., Hamada, R., Inui, E., Kubota, K.（1988）Acoustic survey of spawning sardine, *Sardinops melanosticta* in the coastal waters of west Japan. Bull. Seikai Reg. Fish. Res. Lab. **66**, 101－117.

宅野秀明・上柳昭治（1978）西部太平洋における中層稚魚トロール網による幼・稚魚調査結果. 遠洋水産研究所浮魚資源部. 1－55.

Tanabe, T., Niu, K.(1998) Sampling juvenile skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, and other tunas, *Thunnus spp*., using midwater trawls in the tropical western Pacific. Fish. Bull. **96**, 641－646.

田邉智唯・小倉未基・高橋未緒・渡辺　洋（1998）中層トロール網採集によるパラオ・ミクロネシア周辺海域におけるカツオ・マグロ類稚魚の出現状況. 東北水研研報. **60**, 15－22.

Tanaka, M., Kaji, T., Nakamura, Y., Takahashi, Y.（1996）Developmental strategy of scombrid larvae：High growth potential related to food habits and precocious digestive system development. Survival strategies in early life stages of marine resources. A. A. Balkema. 125－139.

田中　有（1989）南方海域における海外まき網漁業の漁獲量とカツオの年齢組成の経年変化. 東北水研研報. **51**, 89－106.

手島和之・藤石昭生・久保田勝彦・井上　悟・永松公明・阿部　寧・築山一雄・竹下貢二（1993）調査用中層トロール網(Yoko-2型改)の曳網特性. 西水研研報. **71**, 9－16.

Thorrold, S. R.（1993）Post-larval and juvenile scombrids captured in light traps：preliminary results from the central great barrier reef lagoon. Bull. Mar. Sci. **52**, 631－641.

Uchiyama, J. H., Struhsaker, P（1981）Age and growth of skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, and yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, as indicated by daily growth increments of sagittae. Fish. Bull. **79**, 151－162.

上柳昭治（1969）インド・太平洋におけるマグロ類仔稚魚の分布－ビンナガ産卵域の推定を中心とした検討. 遠洋水研報. **2**, 177－256.

上柳昭治・森慶一郎・西川康夫・須田　明（1973）マグロ類養殖技術開発試験報告. 1970年4月～1973年3月. 遠洋水研　S. Series **8**. 1－165.

上柳昭治・西川康夫・松岡玳良（1973）カツオの人工ふ化と仔魚の形態. 遠洋水研報. **10**, 179－188.

魚谷逸朗・松崎加奈恵・牧野祐子・野田聖無・稲村　修・堀川　貢（1981）北西オーストラリア海域産マグロ・カツオ類稚仔の食性. 日水誌. **47**, 1165－1172.

魚谷逸朗・斉藤　勉・平沼勝男・西川康夫（1990）北西大西洋産クロマグロ *Thunnus thynnus* 仔魚の食性. 日水誌. **56**, 713－717.

Wade, C. B.（1951）Larvae of tuna and tuna-like fishes from Philippine waters. Fish. Bull. **51**, 445－485.

Wardron, K. D., King, J. E.（1963）Food of skipjack in the central Pacific. FAO Fish. Rep. **6**, 1431－1457.

Watanabe, H., Moku, M., Kawaguchi, K., Ishimaru, K.,

Ohno, A.(1999) Diel vertical migration of myctophid fishes (Family Myctophidae) in the transitional waters of the western North Pacific. Fish. Oceanogr. **8**, 115－127.

渡辺久也（1958）西部太平洋赤道海域におけるキハダとメバチの食餌組成について．南海水研報．**7**，72－81.

渡邊良朗（1997）年齢形質の有効性検討．水産動物の成長解析．水産学シリーズ115．恒星社厚生閣．17－27.

Watanabe, Y., Oozeki, Y., Kitagawa, D.（1997）Larval parameters determining preschooling juvenile production of Pacific saury (*Cololabis saira*) in the northwestern Pacific. Can. J. Fish. Aquat. Sci. **54**, 1067－1076.

Watanabe, Y., Kuroki, T.（1997）Asymptotic growth trajectories of larval sardine (*Sardinops melanostictus*) in the coastal waters off western Japan. Mar. Biol. **127**, 369－378.

Wild, A., Wexler, J. B., Foreman, T. J.(1995) Extended studies of increment deposition rates in otoliths of yellowfin and skipjack tunas. Bull. Mar. Sci. **57**, 555－562.

Wild, A., Foreman, T. J.（1980）The relationship between otolith increments and time for yellowfin and skipjack tuna marked with tetracycline. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm. Bull. 18：421－482.

矢部 博（1955）西部太平洋における稚魚の研究.1．カツオの後期仔魚．日水誌．**20**，1054－1059.

Yao, M.(1981) Growth of skipjack tuna in the western Pacific Ocean. Bull. Tohoku Reg. Fish. Res. Lab. **43**, 71－82.

横田滝雄・通山正弘・金井富久子・野村星二（1961）南海水研研報．**14**，1－239.

Yoshida, H.(1971) The early life history of skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, in the Pacific Ocean. Fish. Bull. **69**, 545－554.

Young, J. W., Davis, T. L. O.（1990）Feeding ecology of larvae of southern bluefin, albacore and skipjack tunas (Pisces：Scombridae) in the eastern Indian Ocean. Mar. Ecol. Prog. Ser. **61**, 17－29.

水研センター研報，第3号，133－134，平成14年
Bull. Fish. Res. Agen., No.3, 133－134, 2002

和文要旨

マダガスカルのエビ孵化場において*Penaeus monodon*稚エビの付属肢に形成された褐色小塊について（報文）

佐野元彦（西海区水産研究所石垣支所）
岩川秀人・末光正典（国際協力事業団）
皆川　恵（西海区水産研究所石垣支所／西海区水産研究所企画連絡室）
Juliette RASOARINIRO・Louisette RZAFINDRADOANY
（マダガスカルエビ養殖センター）

マダガスカルの孵化場で飼育されているウシエビ*Penaeus monodon*稚エビの付属肢中に褐色小塊がしばしば形成され，斃死原因となっている。病理組織学的検討では，褐色小塊は，メラニン化を伴った血球細胞による宿主反応であり，付属肢先端部の上皮細胞の壊死によって引き起こされたものと推察され，褐色小塊部位には，細菌や寄生虫の感染は確認されなかった。この褐色小塊は，4日間絶食させた稚エビに形成された。褐色小塊のある稚エビを実験用水槽に移し，飼育密度などの飼育条件を改善することによって，小塊は消失し，さらに，絶食により出現する褐色小塊形成は，作用機作は明らかではないが，飼育水への最終濃度25ppmのホルマリン添加により抑制されることも明らかとなった。以上の結果から，本症は，細菌感染により引き起こされるのではなく，水質や摂餌に関連した要因によって発生することが示唆された。

No. 3, 1－6（2002）

夏季東シナ海大陸棚におけるカドミウム，リン，窒素の再生（短報）

阿部和雄（西海区水産研究所石垣支所）

東シナ海大陸棚域において1999年夏，生物制限元素であるカドミウム，リン酸塩，硝酸＋亜硝酸の再生を調べた。これらの元素の鉛直分布は海底に向かってその濃度は増加していた。再生の際に消費された酸素に対する比はモル比で0.00134×10^{-3}：0.00684：0.0998：1であり，この結果は琉球列島近海における以前の調査結果と概ね一致する。冬季から夏季にかけての底層でのカドミウム，リン酸塩，硝酸＋亜硝酸塩の見かけの濃度増加はそれぞれ0.079nM，0.41 μM，6.1 μMであり，これは夏季における底層での有機物分解による活発な供給を示唆する。

No. 3, 27－29（2002）

バフンウニ生殖巣の新規苦味アミノ酸プルケリミンに関する研究（博士号論文）

村田裕子（中央水産研究所）

バフンウニ（*Hemicentrotus pulcherrimus*）は，広く日本沿岸で漁獲されている美味なウニの一種であり，すでに食用部分である生殖巣の呈味成分組成については明らかにされている。しかし，生殖巣に強い苦味を有するために，福島県などバフンウニを漁獲対象としていない地域がある。本研究では，バフンウニの苦味を解明するために，福島県いわき地方に生息する個体を対象とし，苦味の発現頻度，苦味物質の単離と化学構造，苦味物質の分析，味覚生理学的特性について検討した。その内容は以下のように要約される。

1．生殖巣の苦味の発現頻度と季節変化

(1) いわき地方における苦味を有する生殖巣の発現頻度

生殖巣に強い苦味を有するバフンウニが生息する福島県いわき地方の海岸において，バフンウニの大きさ，雌雄の数，苦味の有無について調査を行った。その結果，苦味は成熟した卵巣に特有なものであることが明らかになった。苦味を有する卵巣と苦味のない精巣のアミノ酸組成を比較した結果，既知の苦味アミノ酸でないことを確認した。

(2) 苦味の季節変化

一般にウニは生殖周期を有することから，苦味も成熟過程において増減する事が考えられる。そこで，いわき地方において平成10年11月から平成11年11月までの間，3ヵ月おきにバフンウニ100個体について大きさ，性別，生殖巣の成熟の有無，苦味の有無について調査を行った。その結果，11月から2月までは雌雄の判別が容易な程，成熟が進み，卵巣のほとんどに苦味があった。一方，5月，8月では，未成熟で雌雄の判別の困難な個体が多く苦味のない卵巣も見られた。このように成熟個体数に季節変化は見られるが，成熟個体の分布および生殖巣指数のばらつきから，群としてまとまりのある生殖周期が示されなかった。

2．バフンウニ生殖巣の苦味成分 **pulcherrimine** の構造の解明

(1) **Pulcherrimine** の単離

バフンウニ卵巣628 gを80%エタノールで3回抽出を行い，減圧濃縮後エーテル－水分配を行い水溶性画分を得た。この画分に抽出残渣を20%メタノールで3回抽出を行って得られた抽出物と合わせ減圧濃縮を行った。この水溶性画分について，ODSカラムクロマトグラフィー，Sephadex G-10によるゲルろ過，逆相HPLCを用いて苦味化合物の精製を行い，30mgの苦味化合物を単離した。なお，純度の確認には逆相HPLC（検出：示差屈折計）およびシリカゲルTLC（BuOH-AcOH-DW＝4：1：2で展開，ニンヒドリンで検出）を用い，単一ピーク，単一スポットを確認した。

(2) **Pulcherrimine** の化学構造式（平面構造）

単離された苦味化合物についてHRFAB-MS，元素分析により分子量および分子式を検討した結果，分子量249，分子式$C_9H_{15}O_5NS$であることを明らかにした。

つぎに，各種NMR（一次元^{1}H, ^{13}C，2次元H-H COSY，HMQC，HMBC）により，化学構造を解析した。この化合物は，4-(2'-carboxy-2'-hydroxyethylthio)-2-piperidinecarboxylic acidという新規の含硫アミノ酸であることから，pulcherrimine と命名した。

(3) **pulcherrimine** の立体構造

本化合物は3つの炭素 C-2，C-4，C-2' が不斉炭素であるため，8種類の立体異性体の存在が考えられる。そこで，Pul の立体構造について検討した。本化合物は乳酸とピペコリン酸を硫黄原子をはさんで結合した構造をとっている。まず，NOESY により本化合物のピペコリン酸側の硫黄原子結合炭素 C-4を支点としたときの6員環のひずみ形を明らかにした。つぎに，ニッケル触媒のもとで水素添加により硫黄部位で加水分解後，ピペコリン酸を得た。ピペコリン酸はキラルカラムによる HPLC および Marfey 法によりその立体構造を検討し，D 型であることが確認された。C-2' については2'位の OH 基に（*R*）-MTPA および（*S*）-MTPA を反応させエステルにし，両ジアステレオマーの化学シフトの差を利用した改良 Mosher 法により（*S*）体であることを明らかにした。したがって Pul は 4 *S*-(2'-carboxy-2' *S*-hydroxyethylthio)-2*R*-piperidinecarboxylic acid である。

3．**Pulcherrimine** の分析

(1) 分析方法の検討

アミノ酸のラベル化剤である Dabs-Cl（dinitroaminoazobenzensulphonyl cloride）を用いてPulをDabsyl化し，Dabs-Pul として逆相 HPLC での分析条件を検討した。Pul 濃度に対する検量線は 0 − 4 μg/mℓ の範囲で直線性が得られ，回収率は90%であった。

(2) 苦味の強さと **pulcherrimine** 量との関係

成熟期である1998年11月の試料について，苦味の強さとPul含量を調べた。成熟卵巣では平均1.37mg/100g の Pul が含まれていた，一方，精巣には苦味がなく，Pul は検出されなかった。生殖巣の苦味の強さと Pul 含量との間に有意な相関関係がみられた。

(3) バフンウニ卵巣中の **pulcherrimine** 含量の季節変化

1998年11月から1999年11月まで，3ヵ月ごとにいわき地方のバフンウニ生殖巣中の Pul を定量した。卵巣中の Pul 含量は個体間でばらつきが見られるものの，含量の少ない雌は8月に多く，2月に少なかった。また，Pul 含量の最も高いのは，ほとんどの個体が成熟期である2月であった。このことから，卵巣中の Pul 含量と雌個体の成熟段階と関係があることが示唆された。

4．**Pulcherrimine** の苦味の官能評価

(1) **Pulcherrimine** の閾値

3点識別法により Pul の閾値を調べたところ，検知閾値は0.17mM，認知閾値は0.34mM であった。

(2) バフンウニ生殖巣エキス中における **pulcherrimine** の苦味効果

Pul の生殖巣中での苦味効果を確認するために，未成熟生殖巣，成熟卵巣，成熟精巣よりそれぞれ熱水抽出エキスを調製し，これらのエキスに Pul を添加したときの閾値を調べた。その結果，どの生殖巣エキスにおいても，Pul は検知閾値は0.25mM，認知閾値は0.50mM と同様な苦味効果が示すことが確認された。

5．マウスにおける **pulcherrimine** の味覚生理学的特性の行動学的解析

(1) マウスにおける **pulcherrimine** の行動閾値とその系統差

マウスおける味覚感受性の系統差は種々の味物質において見られる。そこで，C57BL/6 と BALB/c の2つの系統のマウスについて本化合物に対する行動閾値を比較した。4 mM Pulでマウスに条件付けを行い，0.03mM から4 mM までの Pul に対するリック数を調べた。その結果，苦味を識別できる最低濃度すなわち行動閾値は C57BL/6では1 mM，BALB/c は0.1mM と系統差が見られた。なお，予備実験の段階で条件付け可能な最低濃度にも C57BL/6では2～4 mM に対して BALB/c では1～2 mM と系統差が見られた。

(2) 条件付け味覚嫌悪行動からみた各種苦味物質の味覚類似性

C57BL/6と BALB/c マウスに対して4 mM Pul およびその他15種類の呈味物質で条件付けを行い，種々の苦味物質に対する汎化パターンを調べた。Pul で条件付け後 C57BL/6では PTC，PROP，$MgSO_4$硫酸キニーネ（QH_2SO_4）および SOA と Den に対して強い汎化が見られた。BALB/c では，PTC，QH_2SO_4および SOA に強い汎化が見られたが，C57BL/6と比べ，他の苦味物質に対する汎化が弱い傾向にあった。さらに，クラスター解析から，Pul は含硫苦味化合物群および味刺激変換機構において IP_3が関与しているといわれる SOA，Den，Str と同じグループを形成し，それらと味覚類似性が高いことが示された。

水産総合研究センター研究報告

Bulletin of Fisheries Research Agency

編集委員会

編集委員長　中添純一

編 集 委 員　山本正昭、奥田邦明、中野　広、山澤正勝、石塚吉生、芦田勝朗、酒井保次、反町　稔、山越康行

平成14年3月29日　発　行

発　行　所　独立行政法人　水産総合研究センター

〒236-8648　神奈川県横浜市金沢区福浦2-12-4

Fisheries Research Agency

Fukuura 2-12-4, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa 236-8648, Japan

http : //www.fra.affrc.go.jp

発　行　者　畑中　寛

印　刷　所　㈱ポートサイド印刷

ISSN 1346-9894

BULLETIN OF
FISHERIES RESEARCH AGENCY

No. 3
March 2002

Bull.Fish.Res.Agen.

CONTENTS

Original Paper

Brown nodules formed in the appendages of *Penaeus monodon* postlarvae cultured in a hatchery in Madagascar
Motohiko SANO, Hideto IWAKAWA, Masanori SUEMITSU, Megumi MINAGAWA, Juliette RASOARINIRO, and Louisette RZAFINDRADOANY *1*

Annual variations in the conditions of fisheries for *Euphausia pacifica* in Sanriku and Joban waters, northeastern Japan
Kenji TAKI *7*

Short paper

Regeneration of Cd, P, and N on the continental shelf of the East China Sea in summer
Kazuo ABE *27*

Doctoral Thesis

Studies on a Novel Bitter Amino Acid, Pulcherrimine in the Green Sea Urchin Gonads
Yuko MURATA *31*

Studies on the early life ecology of skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, in the tropical western-north Pacific
Toshiyuki TANABE *63*

Abstract (Japanese) *133*